

Francesco Tondini

ANALISI INVERSA PER
L'IDENTIFICAZIONE DEI
PARAMETRI DEI MATERIALI E
DI PROCESSO NELLE
LAVORAZIONI DEI METALLI

March 1, 2010

Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria
Meccanica e Strutturale

Tutor:
prof. Paolo Bosetti

XXII Ciclo

Scuola di Dottorato
Ingegneria delle Strutture:
Modellazione, Conservazione e Controllo
dei Materiali e delle Strutture

Università di Trento
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale
via per Mesiano 77, 38100 Trento
Italia

Summary

The hot stamping of high strength boron steels for producing complex structural components of the car body-in-white is more and more widespread, since the parts produced by this technology are characterized by an excellent geometrical accuracy and an high strength to weight ratio due to the simultaneous forming and quenching stages they undergo during manufacturing.

The research work proposed in this thesis has a twofold objective: the first is to develop a test procedure, reliable and repeatable, to identify the specific global heat transfer coefficient between two surfaces in contact. The second intent, based on the first one, is to qualify some materials suitable for tools devoted to hot stamping, in order to make the process more flexible, controllable and designable.

The introduction chapter presents the developed project, explaining its industrial intent and the possible improvements related to a hot-stamping process.

The second chapter consists in three sections. The first section, dedicated to the literature review, introduces the current hot stamping technology, describes the stages of the industrial process, the materials used, and some CAE (*Computer-Aided Engineering*) instruments, available in the design stage of the process. The second part shows the physical theories behind the general heat exchange and offers a traditional approach to the study of mechanical contact, and physical phenomena that occur, at the separation interface, between two solid bodies. The case of unsteady conduction is treated introducing the model of a simple body, with negligible internal resistance, surrounded by a fluid, with the heat exchange occurring simultaneously for convection and irradiation. The third section underlines the potentiality of using

numerical simulations based on finite element analysis, for designing hot stamping industrial processes. It also offers an overview of three possible identification techniques, namely analogical, analytical and inverse analysis, in order to obtain reliable parameters for the proper calibration of virtual models.

The aim of the third chapter is to show the design and conduction stages of the test developed for the identification of the heat transfer coefficient. Several similar tests are available in literature, but even if these tests were considered as guideline for their way to determine reliable parameters, a dedicated test strategy is proposed in this work to fit the peculiarity of the hot stamping process, with the main purpose to make the final results serviceable in industry. The choice to tightly link the laboratory test design to the industrial process comes from the willingness to obtain results able to give accurate indications on the possible development in the hot stamping process, such as the development recently opened by the use of ceramic dies.

The fourth chapter is dedicated to the description of the HTC identification procedure by finite element inverse analysis, and to the presentation of obtained results. The developed identification procedure, thanks to the availability of redundant input data, permits to immediately qualify the results and certify their reliability.

After the report of the results obtained with the electric analogy analysis, the fifth chapter offers a comparison between these results, the inverse analysis results, and other literature results related to steel dies.

The sixth, and conclusive, chapter reports a process FE simulation carried out by using the identified HTC values. The simulation refers to a generic hot-stamping industrial process without deformation using dies made of partially stabilized zirconia. The geometric lay-out of the simulation is almost the same as the one used in the identification procedure; this identity allows to take advantage of several settings of the FE analysis, already tested and validated. The main input data of this simulation, that are HTC and the initial temperatures of sheets and dies, are estimated through technological and microstructural considerations that aim to make the simulation as close to the industrial conditions as possible.

The presented work was carried out at DIMS and DIMAT labs, at University of Trento, from November 2006 to November 2009 under the supervision of Prof. Paolo Bosetti.

Sommario

Il lavoro presentato in queste pagine ha come duplice scopo quello di approntare una procedura di prova affidabile e ripetibile per la misura del coefficiente di scambio termico superficiale globale specifico tra due corpi e quello di ricercare e qualificare dei materiali idonei alla produzione di utensili per lo stampaggio a caldo in grado di rendere maggiormente flessibile e controllabile questo processo.

L'introduzione al lavoro si propone di mettere in risalto la rilevanza industriale dello stesso, illustrando le possibili ricadute sul processo di stampaggio a caldo e le prospettive di questa tecnologia. Nella prima sezione (2.1) del secondo capitolo, dedicato alla ricerca bibliografica, sono riportate le informazioni che riguardano lo stato dell'arte della tecnologia dello stampaggio a caldo della lamiera, con la descrizione del processo industriale, dei materiali usualmente impiegati e degli strumenti CAE (*Computer-Aided Engineering*) disponibili in fase di progettazione del processo; la seconda Sezione (2.2) illustra le convenzioni e le leggi fisiche che descrivono il fenomeno dello scambio termico tra corpi: in questa sezione è esposto un approccio tradizionale allo studio del contatto termo-meccanico e dei fenomeni fisici che avvengono all'interfaccia tra due corpi. Lo studio della conduzione in regime non stazionario è affrontato presentando il caso semplice di un corpo con resistenza interna trascurabile immerso in un fluido, col quale scambia calore per convezione e irraggiamento. La terza Sezione (2.3) del secondo capitolo sottolinea le potenzialità dell'utilizzo della simulazione numerica con analisi agli elementi finiti nella progettazione dei processi industriali (in particolare dello stampaggio a caldo della lamiera), sottolineando l'importanza dell'inserimento di dati di input attendibili per ottenere risultati affidabili. Proprio l'identificazione dei parametri

di processo da inserire nelle simulazioni numeriche è l'oggetto dei lavori presentati nella seconda parte di questa Sezione: l'identificazione analitica, il metodo analogico, l'analisi inversa con le relative tecniche di ottimizzazione sono metodologie di identificazione largamente utilizzate.

Il terzo capitolo illustra la progettazione e la conduzione di un test per la determinazione del coefficiente di scambio termico: altri test simili sono proposti in letteratura per la determinazione del coefficiente di scambio termico tra stampi e pezzo nel caso di lavorazioni massive (forgiatura). Pur prendendo spunto da questi test e soprattutto dalle linee guida dettate per renderli attendibili, la prova condotta in laboratorio presenta numerosi accorgimenti studiati appositamente per rendere i risultati del test attendibili anche industrialmente: la scelta di fondo di vincolare la progettazione del test di laboratorio al processo industriale è dettata appunto dalla volontà di ottenere dei risultati che diano precise indicazioni sulle prospettive aperte alla tecnologia dello stampaggio a caldo dall'impiego di stampi ceramici.

Il quarto capitolo è dedicato alla descrizione della procedura di identificazione del HTC attraverso analisi inversa agli elementi finiti ed alla presentazione dei risultati ottenuti. Questa metodologia di identificazione consente, grazie alla parziale ridondanza dei dati rilevati durante i test, anche la qualificazione dei risultati ottenuti, la cui attendibilità può essere quindi valutata già in sede di analisi dei dati rilevati.

Nel quinto capitolo, dopo aver presentato i risultati ottenuti sfruttando l'analogia elettrica, questi vengono confrontati con quelli ottenuti dall'analisi inversa e con quelli disponibili, per stampi in acciaio, in letteratura.

Il sesto capitolo, che conclude il lavoro, riporta la simulazione di processo condotta utilizzando i valori di HTC identificati: la simulazione è riferita ad un generico processo industriale, con l'utilizzo di stampi in zirconia parzialmente stabilizzata. La configurazione geometrica della simulazione si scosta di poco rispetto a quella utilizzata per l'identificazione: in questo modo si possono sfruttare numerose impostazioni dell'analisi FE già collaudate e validate. I dati di input della simulazione (essenzialmente temperatura della lamiera e degli stampi, oltre ovviamente ad HTC) sono stimati attraverso considerazioni tecnologiche e microstrutturali che mirano a rendere la simulazione il più possibile realistica.

Il lavoro presentato è stato condotto presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Strutturale e di Ingegneria dei Materiali dell'Università di Trento, dal mese di novembre del 2006 al mese di novembre del 2009, sotto la guida e supervisione del Prof. Paolo Bosetti.

Contenuti

1	Introduzione	1
1.1	Il caso industriale	2
1.2	L'identificazione del <i>HTC</i>	4
1.3	L'obiettivo e l'organizzazione del lavoro	5
2	Stato dell'arte	7
2.1	Lo stampaggio a caldo della lamiera	7
2.1.1	L'industria automobilistica	8
2.1.2	Il processo	9
2.1.3	I parametri di processo	11
2.1.4	Il 22MnB5	12
2.1.5	Gli stampi	13
2.2	Lo scambio termico	14
2.2.1	Conduzione, convezione, irraggiamento	14
2.2.2	Le proprietà termiche dei materiali	16
2.2.3	Conduzione termica in regime variabile	17
2.2.4	Il contatto termo-meccanico	18
2.2.5	Il coefficiente di scambio termico globale specifico apparente	19
2.3	L'identificazione dei parametri per la simulazione del processo	20
2.3.1	Identificazione analitica	22
2.3.2	L'analisi inversa	23
2.3.3	Le tecniche di ottimizzazione	25
2.3.4	Il metodo analogico	26
3	Prove sperimentali	29
3.1	La prova	30

3.1.1	La conduzione della prova	30
3.1.2	Apparecchiatura di prova e sistemi di acquisizione	32
3.1.3	Le misure	34
3.1.4	Il piano sperimentale	36
3.2	Il campione	36
3.3	Gli stampi	39
3.3.1	Geometria degli stampi	39
3.3.2	L'acciaio per stampi	41
3.3.3	Materiali ceramici	41
3.4	I dati rilevati	43
3.4.1	L'interpretazione dei dati rilevati	45
3.4.2	Le misure di microdurezza	48
3.4.3	Riassunto dei dati rilevati	48
4	Identificazione tramite analisi inversa agli elementi finiti ..	51
4.1	Il modello numerico	51
4.1.1	Gli aspetti meccanici e microstrutturali	52
4.1.2	La simulazione dell'approccio	53
4.1.3	La simulazione per l'identificazione	54
4.1.4	Il confronto tra i modelli utilizzati	54
4.1.5	Confronto tra l'efficienza numerica dei modelli. ...	55
4.2	L'analisi inversa	57
4.2.1	L'analisi di robustezza	58
4.2.2	Il dominio di ricerca	58
4.2.3	La funzione obiettivo	61
4.2.4	L'ottimizzazione	62
4.3	Risultati	67
5	Identificazione analitica	73
5.1	L'analogia elettrica	74
5.1.1	Il modello elettrico	74
5.1.2	Risultati	77
5.2	Confronto tra i risultati ottenuti	77
5.3	Confronto con i risultati presenti in letteratura	79
6	Simulazione di processo	83
6.1	La simulazione	83
6.1.1	La configurazione geometrica	84
6.1.2	I materiali	85

	Contenuti	1
6.1.3	I parametri di input	86
6.2	Risultati	88
7	Conclusioni	93
	Riferimenti bibliografici	95

Introduzione

L'industria automobilistica è da sempre, ed in particolare negli ultimi anni, attenta alla sicurezza attiva e passiva dei veicoli; inoltre, negli ultimi due decenni in special modo, è notevolmente cresciuta l'attenzione del mercato riguardo la riduzione dei consumi, fermo restando il livello delle prestazioni (inteso come velocità ed accelerazione, ma anche come comportamento dinamico, spazio d'arresto, ecc . . .), irrinunciabili in un mondo in cui la velocità di spostamento aumenta di pari passo con lo sviluppo di ogni tipo di attività umana.

Velocità, bassi consumi, sicurezza: queste le parole che sintetizzano gli obiettivi odierni dei grandi costruttori di auto. L'evoluzione tecnologica ha visto un aumento molto importante dell'utilizzo dell'elettronica e di recente anche dell'informatica per migliorare le prestazioni dei veicoli, ma anche dal punto di vista meccanico i passi fatti sono notevoli. L'impiego di materiali sempre più leggeri e sempre più robusti ha permesso la riduzione del peso dei veicoli, con conseguente ricaduta positiva sulle prestazioni dinamiche e sui consumi, e parallelamente l'aumento della sicurezza sia attiva (miglior comportamento dinamico) che passiva (scocche a deformabilità programmata in primis).

Tra questi materiali robusti e leggeri vi sono leghe di magnesio e alluminio e acciai speciali: generalmente, questi materiali sono acquistati dall'industria automobilistica in forma di lamiera, che viene poi lavorata nei modi più opportuni per conferirvi forma e proprietà desiderati. In questo contesto ha iniziato a prendere piede lo stampaggio a caldo e a tiepido della lamiera, necessario per poter lavorare le leghe di magnesio ed alluminio a temperature in cui questi materiali hanno sufficiente lavorabilità per deformazione plastica.

Lo sviluppo dello stampaggio a caldo ha suggerito un suo impiego

anche per la lavorazione di altri materiali, ad esempio l'acciaio al boro rivestito: le lamiere di questo materiale, stampate a caldo e raffreddate in stampo, modificano la loro microstruttura e offrono a fine lavorazione eccellenti proprietà meccaniche a fronte di un peso relativamente contenuto.

Il presente lavoro si propone di esplorare una nuova frontiera dello stampaggio a caldo: il controllo della velocità di raffreddamento in stampo. Ad oggi il processo è finalizzato alla produzione unicamente di componenti a microstruttura completamente martensitica: la progettazione mira ad ottenere elevate velocità di raffreddamento in stampo, con l'adozione di stampi in acciaio, spesso anche raffreddati per migliorare l'estrazione di calore dal pezzo in lavorazione. Lo sviluppo, abbastanza recente, di materiali ceramici dalle elevatissime proprietà meccaniche e dalle proprietà termiche sensibilmente diverse rispetto a quelle dell'acciaio, ha suggerito un'indagine riguardo la possibilità di utilizzare stampi in materiale ceramico e riguardo la ricaduta di questa scelta sulla velocità di raffreddamento del pezzo. Una delle prospettive che si possono prefigurare è la creazione di stampi in acciaio con inserti ceramici, in grado di eseguire una tempra differenziale del pezzo in lavorazione e conferire allo stesso dei gradienti microstrutturali.

Nel seguito di questo lavoro si farà riferimento al processo di stampaggio a caldo di lamiere in acciaio al boro 22MnB5, in particolare all'acciaio rivestito sviluppato da Arcelor e noto col nome commerciale di Usibor 1500P[®]. Questa lamiera è composta da un bulk interno di acciaio al boro e da un rivestimento di ossido di alluminio e silicio dello spessore minimo di 20 μm : grazie alla presenza del rivestimento l'ossidazione a caldo della lamiera è notevolmente ridotta, così da permettere l'ottenimento a fine stampaggio di un manufatto esteticamente bello e di finitura adeguata, senza bisogno di ulteriori riprese a macchina utensile.

1.1 Il caso industriale

Le tecnologie di stampaggio a caldo e tiepido di prodotti laminati hanno subito negli ultimi anni un notevole sviluppo, grazie alle loro potenzialità nella lavorazione sia di laminati in leghe non tradizionali (leghe di magnesio in primo luogo), sia di lamiere ferrose. Il processo

di stampaggio a caldo prevede il riscaldamento della lamiera, il mantenimento in temperatura, il trasferimento (il più rapido possibile) in stampo ed infine la formatura del pezzo con contemporaneo raffreddamento.

I parametri del processo, scelti in base al materiale lavorato e alle caratteristiche desiderate del pezzo finito, sono: temperatura di riscaldamento; tempo di mantenimento in temperatura; decadimento termico durante il trasferimento in stampo; decadimento termico in stampo. La temperatura di riscaldamento è scelta in base alla motivazione dell'impiego dello stampaggio a caldo: per le leghe di magnesio, poco duttili a temperatura ambiente, si sfrutta una finestra di alta formabilità della lega in corrispondenza dei 400 °C, mentre per le leghe ferrose, che subiscono un importante trattamento termico in stampo, la temperatura di riscaldamento è corrispondente a quella di austenitizzazione (circa 900 °C). Il tempo di mantenimento in temperatura è il minimo sufficiente all'omogeneizzazione termica e dipende quindi dalle proprietà termiche della lamiera (sia del materiale che geometriche) e dalle caratteristiche del forno.

Il decadimento termico durante trasferimento è un effetto collaterale del processo, che si tende a minimizzare sia con trasferimenti molto rapidi che con l'adozione di altri sistemi (capsule termiche o altro). Nel caso delle leghe ferrose come in quello delle leghe alternative è importante che la formatura in stampo avvenga alla giusta temperatura, nel primo caso per evitare mutamenti di fase non controllati, nel secondo per sfruttare la giusta finestra di lavorabilità del materiale.

Attraverso lo stampaggio a caldo si producono componenti di geometria anche piuttosto complessa, sotto condizioni termomeccaniche di interazione stampo-lamiera che variano localmente in modo marcato: per questo motivo l'approccio al problema termico del raffreddamento da affrontare in sede di progettazione del processo avviene attraverso analisi FE. Questo tipo di analisi ha come obiettivo la ricostruzione dell'evoluzione nel tempo del campo termico dello stampo e del pezzo a partire dalla conoscenza delle grandezze termiche e meccaniche che descrivono le condizioni iniziali in cui vengono a contatto. Tra le variabili di input da inserire per ottenere una corretta simulazione (e progettazione) del processo, particolarmente importante è il coefficiente di scambio termico superficiale (o *heat transfer coefficient*, *HTC*). Questo parametro quantifica la potenza termica trasmessa attraverso la superficie di separazione tra due corpi rispetto all'unità di superficie e ad

una differenza di temperatura tra le due superfici a contatto unitaria. In una simulazione del processo di stampaggio, in cui il pezzo è in contatto completo con lo stampo, la conoscenza dell' HTC , delle proprietà termiche e meccaniche dei materiali di stampo e pezzo sono necessarie per prevedere l'evoluzione reale del processo ed intervenire per controllarlo.

1.2 L'identificazione del HTC

La determinazione del coefficiente di scambio termico è di particolare interesse industriale dopo il recente sviluppo delle tecnologie di stampaggio a caldo e/o tiepido utilizzate per stampare leghe leggere, ultraleggere ed acciai altoresistenziali. Nello stampaggio tradizionale, i trattamenti termici seguono la formatura ed avvengono utilizzando come mezzo di estrazione del calore un fluido, sia esso aria (compressa o meno), oppure un liquido (acqua, olio, ecc.). Il progettista che si occupa di ottimizzare il trattamento termico, dispone di dati ottenuti attraverso l'esecuzione di prove che vengono effettuate in condizioni normate (ad esempio la ISO 9950 e la ASTM D 6200-97). Tali condizioni, nel caso del raffreddamento in fluido, fissano materiale e geometria del pezzo, temperatura del fluido, grado di agitazione del bagno, ecc. .

Il raffreddamento a contatto solido, al contrario di quello a bagno in mezzo fluido, è scarsamente studiato e non ancora normato. Il parametro che descrive l'estrazione di calore dal pezzo, a parità di proprietà termiche e meccaniche del pezzo stesso e del mezzo raffreddante, sia nel caso di mezzo fluido che solido, è il coefficiente di scambio termico globale superficiale (HTC). Tale parametro di processo dipende fortemente dalle condizioni di contatto, quali il grado di agitazione per il mezzo fluido e le caratteristiche geometriche e microgeometriche delle superfici a contatto per il mezzo solido. Pertanto, anche nel caso di raffreddamento a contatto solido è opportuno individuare una procedura di test che sia ripetibile e che permetta un buon controllo delle condizioni di prova, così da poter replicare fedelmente le condizioni industriali e ottenere così risultati maggiormente affidabili nella determinazione del HTC .

I lavori presenti in letteratura in quest'ambito, indagano il processo di stampaggio nel suo stato dell'arte, mentre col presente si avanzano proposte di differenziazione del processo per una sua maggior

flessibilità ed un suo maggiore e migliore controllo: qualificare materiali diversi dal tradizionale acciaio impiegato nella costruzione degli stampi è l'obiettivo del lavoro. La presenza in commercio di materiali ceramici dalle ottime prestazioni meccaniche rappresenta una frontiera tecnologica che può essere sfruttata in modo estremamente interessante nel processo di stampaggio a caldo della lamiera.

1.3 L'obiettivo e l'organizzazione del lavoro

Il presente lavoro è stato concepito per perseguire due obiettivi: il primo è quello di definire una procedura sperimentale, semplice e affidabile, per la determinazione del coefficiente di scambio termico superficiale tra stampo e lamiera durante il processo dello stampaggio a caldo. Il secondo è quello di individuare dei materiali per la costruzione di stampi che permettano di sfruttare il processo di stampaggio a caldo delle lamiere in acciaio per la produzione di pezzi con gradienti microstrutturali (con zone del pezzo completamente martensitiche ed altre con microstruttura più dolce).

Il lavoro presentato tratta nella sua parte iniziale dell'attuale stato dell'arte: vengono presentati il contesto industriale dello stampaggio a caldo, la sua progettazione, le modalità di conduzione con gli aspetti tecnologici più rilevanti, il prodotto finito e le sue caratteristiche. Colta l'importanza di conoscere il HTC per ottimizzare il processo di stampo, vengono illustrati i concetti e le leggi fisiche principali per la comprensione del fenomeno dello scambio termico. In conclusione del secondo capitolo è riportata una sintesi dei principali lavori che hanno come obiettivo l'identificazione di parametri di processo, in particolar modo del coefficiente di scambio termico superficiale.

Nel terzo capitolo è descritta la prova sperimentale: materiali testati, apparecchiatura di misura e di prova, piano sperimentale vengono presentati ponendo particolare attenzione agli accorgimenti tecnici che rendono i risultati del test attendibili. I dati rilevati nel corso della prova vengono processati per determinare il HTC secondo due tecniche diverse: la prima, più laboriosa, si basa sull'analisi inversa agli elementi finiti, mentre la seconda, più grezza, sfrutta il metodo analogico per lo studio del problema termico. I risultati delle identificazioni condotte con le due tecniche vengono messi a confronto tra di loro e, ove possibile, confrontati con i dati sull' HTC disponibili in letteratura.

Infine è presentata una simulazione del processo di stampaggio a caldo condotta basandosi sui risultati ottenuti nel lavoro: questa simulazione si propone di capire e dimostrare come l'impiego di stampi in materiale ceramico, e particolarmente in zirconia parzialmente stabilizzata (zirconia p.s.), offre la possibilità di ottenere, in modo controllato, componenti a microstruttura non martensitica.

Stato dell'arte

Nei prossimi paragrafi sono riassunti dei lavori che descrivono il processo di stampaggio a caldo e lo studiano, in particolare dal punto di vista termico. In questi lavori si trovano indicazioni sui parametri di controllo del processo, sulle strategie di conduzione, le leggi fisiche che lo regolano e le tecniche per individuarle.

Dopo la descrizione del processo, è proposto lo studio del fenomeno di scambio di calore tra due corpi solidi e le attuali tecniche di simulazione numerica (basate sull'analisi agli elementi finiti *FEA*) delle quali il progettista si avvale per prevedere l'evolvere del processo e le caratteristiche del pezzo finito.

Infine sono presentate le tecniche di identificazione dell' *HTC* in condizioni simili a quella considerata, riconducendo le metodologie a due classi fondamentali: la misura indiretta attraverso risoluzione analitica del problema semplificato e identificazione del parametro attraverso analisi inversa agli elementi finiti.

2.1 Lo stampaggio a caldo della lamiera

L'adozione di lavorazioni per deformazione plastica coincide, o forse addirittura anticipa secondo alcuni, la nascita della metallurgia, della quale le testimonianze più antiche (risalenti all'ottavo millennio prima di Cristo) si sono ritrovate in Anatolia, dove vi sono chiari segni di operazioni di fusione del rame [1]. A quest'epoca, in cui è fiorita la rivoluzione neolitica dell'agricoltura, risalgono anche le prime lavorazioni plastiche dei materiali nativi (oro, argento, rame, ma anche ferro meteoritico): si trattava per lo più di martellature, rudimentali

operazioni di forgiatura fatte prima a freddo e in seguito a caldo.

Da allora la tecnologia di lavorazione dei metalli è progredita in modo piuttosto lento fino alla rivoluzione industriale, durante la quale la tecnologia messa al servizio delle conoscenze teoriche ha permesso lo sviluppo di nuovi macchinari e nuove tecniche di lavorazione.

La lavorazione per deformazione plastica della lamiera, nota e praticata già da molto tempo, si propone a partire dagli anni ottanta del novecento come uno dei settori dell'industria di base in maggiore espansione. Ciò si deve allo sviluppo dell'automazione, cui la lavorazione della lamiera si presta agevolmente, che rende i manufatti in lamiera stampata decisamente competitivi sul mercato rispetto a quelli prodotti con altre tecnologie [2] (fonderia, lavorazioni per asportazione di truciolo, forgiatura massiva, ecc. . .).

2.1.1 L'industria automobilistica

I prodotti in lamiera stampata a caldo sono destinati in gran parte all'industria del trasporto, particolarmente al comparto automobilistico, da sempre protagonista delle più significative innovazioni nelle tecnologie dei processi di formatura della lamiera [3]. Gli obiettivi di tale industria, a partire dalla metà degli anni novanta in avanti, sono [4]:

- riduzione dei consumi e dell'impatto ambientale: ottenuta, oltreché attraverso il miglioramento della meccanica del veicolo, attraverso la riduzione del peso del veicolo stesso, senza pregiudicarne sicurezza ed funzionalità;
- aumento di sicurezza attiva del veicolo: ottenuta anche attraverso l'irrigidimento del telaio;
- aumento di sicurezza passiva del veicolo: ottenuta anche grazie all'adozione di elementi a deformabilità programmata per la scocca;
- incremento degli standard qualitativi: ottenuta aumentando la precisione e l'accuratezza dei singoli componenti (stampati), per facilitare un assemblaggio rapido, economico e affidabile.

La riduzione del peso e l'aumento della resistenza meccanica dei componenti del telaio sono possibili attraverso l'utilizzo di leghe leggere ed ultraleggere (largamente utilizzate sono le leghe di magnesio e di alluminio [6]) e di acciai alto-resistenziali. A fronte delle loro ottime caratteristiche meccaniche questi materiali risultano, a freddo, poco formabili ed affetti da un significativo ritorno elastico, che condiziona

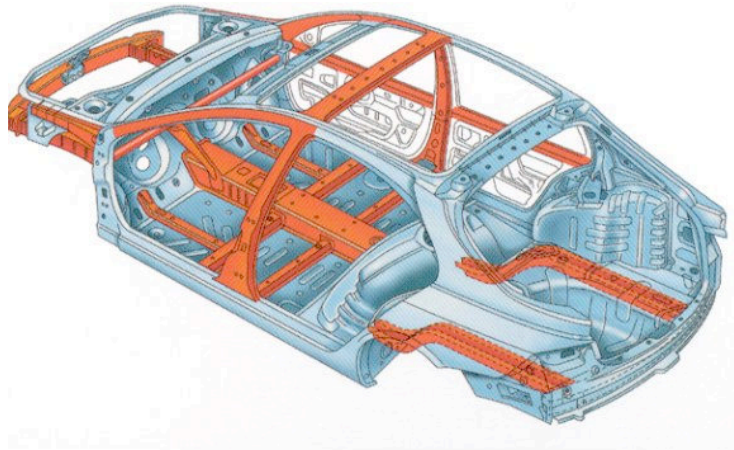


Fig. 2.1. Visualizzazione dei componenti della scocca di un veicolo prodotti in acciaio al boro stampato a caldo. Immagine adattata da [5]

l'accuratezza e la precisione geometrica del pezzo finito [5], nonché di difficile lavorazione, a causa dei carichi sugli stampi e della loro conseguente elevata usura.

La tecnologia di produzione basata sullo stampaggio a caldo [7,8] riduce di molto gli svantaggi elencati: le leghe leggere inoltre, a temperature di 400-500 °C, hanno buona deformabilità, offrono minor resistenza meccanica alla formatura e hanno comportamento più duttile, consentendo deformazioni plastiche maggiori e determinando un minor ritorno elastico [9-11] .

Il processo che viene presentato nelle seguenti sezioni è quello riguardante lo Usibor 1500P[®] sotto forma di lamiera dello spessore di 1.5 mm, che essendo il materiale più largamente impiegato dall'industria automobilistica su scala mondiale [12], è stato scelto come materiale di riferimento per questo lavoro di tesi.

2.1.2 Il processo

Nel processo considerato, i fogli di lamiera vengono riscaldati fino oltre la temperatura di austenitizzazione (ca. 900 °C) e poi trasferiti in una pressa dove simultaneamente raffreddano e subiscono la formatura. Questa tecnica di lavorazione della lamiera è utilizzata per produrre componenti con microstruttura martensitica [13, 14], ottenuta grazie alle elevate velocità di raffreddamento che si raggiungono utilizzando stampi in acciaio, spesso anche raffreddati [15].

Il forno di riscaldamento, generalmente con due aperture distinte per il carico e lo scarico così da permettere la continuità delle operazioni, è collocato nelle immediate vicinanze della pressa per ridurre al minimo il tempo di trasferimento dei fogli caldi in stampo: in questo modo, oltre a innalzare la temperatura di formatura, si riduce l'ossidazione a caldo dei fogli esposti in aria. L'operazione di caricamento del forno e di trasferimento in stampo può essere manuale, semiautomatica o automatica a seconda delle esigenze e delle disponibilità aziendali.

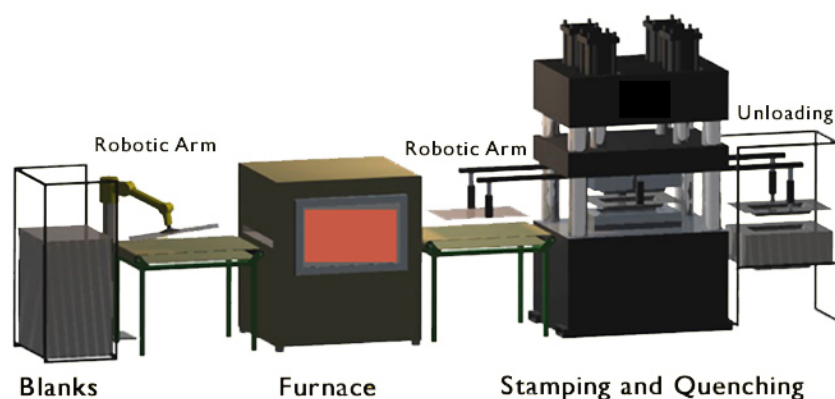


Fig. 2.2. Schematizzazione del processo standard automatizzato in cui si colloca lo stampaggio a caldo della lamiera.

Durante il trasferimento dal forno allo stampo, il foglio di lamiera subisce un abbassamento di temperatura di circa 200°C , scambiando calore con l'ambiente circostante essenzialmente per irraggiamento [5]. La formatura avviene partendo da una temperatura di chiusura degli stampi di circa 700°C . La lamiera subisce in stampo la deformazione plastica che le conferisce la geometria desiderata, e contemporaneamente si raffredda per essere rimossa dallo stampo ad una temperatura di circa 150°C , a trasformazioni metallurgiche completamente avvenute [5]. Il processo, dall'istante in cui il foglio di lamiera viene estratto dal forno all'istante in cui gli stampi si aprono e il pezzo finito viene rimosso, dura tra i 20 s ed i 30 s, a seconda della geometria del pezzo stampato [5].

Le presse impiegate sono quelle tradizionali per lo stampaggio a freddo, di tonnellaggio vario a seconda delle esigenze, mentre per i dettagli riguardanti gli stampi si rimanda alla Sezione 2.1.5. Il ciclo

termo-meccanico a cui è sottoposto il materiale durante un'operazione di stampaggio a caldo è rappresentato in Figura 2.3.

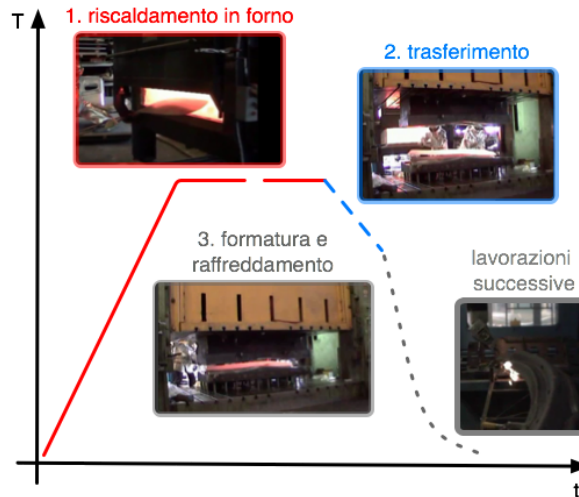


Fig. 2.3. Rappresentazione delle operazioni fondamentali del processo e del ciclo termico applicato alla lamiera in lavorazione.

2.1.3 I parametri di processo

Per parametri di processo si intendono i fattori, più o meno controllabili, che influenzano direttamente il risultato del processo di stampaggio a caldo. In questa sede, l'interesse è focalizzato sul ciclo termico subito dal componente in forno, durante il suo trasferimento in pressa e durante la formatura in stampo. I parametri di processo considerati sono [16]:

- velocità di riscaldamento in forno;
- temperatura di austenitizzazione;
- raffreddamento durante il trasferimento dal forno allo stampo;
- temperatura di "primo contatto";
- velocità di raffreddamento in stampo.

I primi due parametri sono facilmente controllabili: la velocità massima di riscaldamento del pezzo è di 12 Ks^{-1} , per evitare il deterioramento del rivestimento della lamiera, e la temperatura di austenitizzazione, da mantenere per 5-10 min secondo le dimensioni del foglio

lavorato e le caratteristiche del forno, è di 850-950 °C, la minima per garantire la trasformazione di fase in tutto il pezzo in tempi ridotti [17]. Il terzo parametro, la velocità di raffreddamento durante il trasferimento dal forno alla postazione di stampaggio, non può essere controllato in modo diretto. Si tende a minimizzare il tempo di trasferimento, così da non indurre trasformazioni microstrutturali nella lamiera prima che essa venga in contatto con lo stampo.

La temperatura di "primo contatto" è diretta conseguenza del raffreddamento durante trasferimento. La conoscenza di questo parametro ed il suo controllo sono di fondamentale importanza sia per quanto detto riguardo le trasformazioni microstrutturali sia per simulare correttamente il processo, in quanto la temperatura di "primo contatto" individua l'intervallo di temperatura entro il quale vanno definite le proprietà termiche e meccaniche dei materiali.

La velocità di raffreddamento in stampo determina la microstruttura finale del componente: dipende dal coefficiente di scambio termico globale HTC tra stampo e pezzo in lavorazione, dalle proprietà termiche della lamiera, dalla geometria e dal materiale dello stampo.

2.1.4 Il 22MnB5

Affinché il processo di stampaggio a caldo dia risultati soddisfacenti, è molto importante disporre di lamiere in materiale idoneo. Negli anni sono stati sviluppati materiali che limitano considerevolmente gli inconvenienti che lo stampaggio a caldo può comportare (ossidazione a caldo, prima di tutto) ed esaltano i vantaggi (tempra in stampo su tutti) connessi al processo.

Il materiale maggiormente impiegato nel processo, ad oggi, è il 22MnB5: in condizioni di fornitura presenta una microstruttura ferritico-perlitica ed è caratterizzato da una tensione ultima UTS di circa 600 MPa. La temprabilità del materiale consente, dopo stampaggio, di ottenere un prodotto con tensione ultima UTS di circa 1500 MPa. Di seguito sono riportate la composizione chimica del 22MnB5 (Tabella 2.1.4), mentre le proprietà termiche e meccaniche principali del materiale scelto per i test sono riportate nel prossimo capitolo.

La presenza del boro, anche in percentuali minime, limita l'accrescimento del grano cristallino ad elevata temperatura e conferisce al materiale ottime attitudini di tempra.

Per evitare l'ossidazione a caldo durante l'esposizione in aria nel corso

C	Mn	Si	Cr	Ti	B
0.25	1.40	0.35	0.30	0.05	0.005

Table 2.1. Composizione chimica del 22MnB5, [12]

del trasferimento dal forno alla pressa, le lamiere da stampaggio a caldo sono rivestite con uno strato di ossidi che proteggono il materiale e migliorano la finitura del pezzo, eliminando così le operazioni post-stampaggio di rimozione di ossidi in forma di scaglia (sabbatura o altro). I rivestimenti possono essere di vario tipo, e sono brevettati dalle aziende che li producono [12]

2.1.5 Gli stampi

Nel processo di stampaggio a caldo la progettazione dello stampo è di fondamentale importanza, in quanto buona parte del costo del pezzo finito dipende dal costo degli stampi. Lo stampo deve essere lavorabile in modo relativamente facile alle macchine utensili e garantire la possibilità di compiere un elevato numero di operazioni di stampaggio senza subire alterazioni di forma.

Ad oggi, gli stampi sono prodotti in acciaio inox, secondo le prescrizioni della normativa AISI h11 (Stati Uniti) ed UNI EN ISO 4957 (per l'Italia): devono garantire buona resistenza all'ossidazione, elevata resistenza meccanica a caldo, resistenza agli shock termici ed alla fatica termica. Queste caratteristiche sono ottenute limitando la concentrazione di carbonio ($<0.4\%$) ed aggiungendo il vanadio che mantiene le dimensioni del grano ridotte anche ad elevate temperature.

Attualmente il processo di stampaggio a caldo della lamiera mira alla tempra in stampo, pertanto la preoccupazione del progettista è quella di ottenere un raffreddamento rapido ed omogeneo in ogni regione dello stampo. Per situazioni particolari, in cui una parte dello stampo si surriscalda eccessivamente impedendo alla porzione di pezzo a contatto con essa di raffreddarsi in modo sufficientemente rapido, si ricorre ad raffreddamento forzato attraverso l'adduzione di liquido in appositi canali di raffreddamento interni allo stampo [18].

2.2 Lo scambio termico

Lo scambio di calore tra pezzo e stampi durante il processo di stampaggio a caldo è un problema termico in regime non stazionario. Il suo studio richiede la conoscenza dei meccanismi di trasmissione del calore, delle proprietà termiche dei materiali e delle soluzioni delle equazioni differenziali che descrivono situazioni di questo tipo per casi geometricamente semplici e con condizioni al contorno definite in modo rigoroso.

Il calore è quella forma di energia che si manifesta nel passaggio da un corpo ad un altro quando tra i due vi è differenza di temperatura. Il primo principio della termodinamica stabilisce l'equivalenza delle varie forme di energia; il secondo fissa il senso del trasferimento spontaneo di calore: da corpo a temperatura elevata a corpo a temperatura più bassa. Il fenomeno del trasferimento di calore interessa il mondo fisico in generale, dalla vita quotidiana ai vari settori della tecnica, spesso manifestandosi come effetto collaterale di fenomeni fisici che coinvolgono altre forme d'energia.

La comprensione completa dei fenomeni di scambio di calore necessita della conoscenza del comportamento dei corpi e dei materiali rispetto al trasferimento di calore: ciascun materiale ha delle diverse proprietà di assorbimento e di trasporto interno di calore, che determinano non solo le modalità e l'entità del trasferimento di calore, ma anche il conseguente campo termico del corpo stesso.

Negli anni 50 e 60 del secolo scorso, prima dell'avvento dei computer digitali, i fenomeni di scambio termico e trasmissione del calore sono stati ampiamente studiati attraverso lo studio di circuiti elettrici: il parallelismo formale con leggi e grandezze dei sistemi elettrici consente una risoluzione del problema termico semplificata a parametri concentrati, che di fatto è una prima applicazione del metodo delle differenze finite, largamente utilizzato nei programmi di risoluzione numerica di problemi termici [19,20].

2.2.1 Conduzione, convezione, irraggiamento

I modi di trasmissione del calore sono riconducibili a tre categorie [21]: conduzione, convezione e irraggiamento. Spesso i tre modi sono concomitanti.

La conduzione termica, che si manifesta a livello macroscopico come scambio di calore senza movimento apparente di materia, è dovuta

alla cessione di energia cinetica da parte di molecole, in zona ad alta temperatura, a quelle in zona a più bassa temperatura. Nei metalli, si aggiunge all'energia molecolare anche quella elettronica dovuta appunto al movimento degli elettroni: per questo i metalli sono dei buoni conduttori di energia termica.

La legge di Fourier definisce il coefficiente di conduttività termica per il materiale isotropo ed omogeneo costituente una parete, le cui due superfici parallele di grandezza infinita che la confinano sono mantenute a temperatura costante:

$$Q = \frac{K A}{l} (T_1 - T_2) \Delta t \quad (2.1)$$

In termini di flusso:

$$q = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{K A}{l} (T_1 - T_2) \quad (2.2)$$

dove:

Q : calore trasmesso;

K : conducibilità termica, W/m/K;

A : area della superficie di contatto tra stampo e pezzo, m^2 ;

T_1 : temperatura della superficie più calda, K;

T_2 : temperatura della superficie più fredda, K.

Il valore della conduttività termica varia dai 0.007 W/m/K per i gas con elevata massa molecolare fino ai 440 W/m/K dell'argento, dipende dalle condizioni di pressione e temperatura, ma rimane una proprietà propria della sostanza, indipendente quindi dagli altri termini delle 2.1 e 2.2.

La convezione termica consiste nel trasporto del calore che si attua in presenza di movimento macroscopico relativo di particelle di un fluido che lambisce la superficie di un corpo solido. Il trasporto di calore dalla superficie al fluido (o viceversa) è descritto in termini di flusso dalla relazione di Newton (1701):

$$q = \alpha A (T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

dove:

Q : calore estratto dal pezzo;

α : coefficiente di scambio termico specifico, W/ m^2 /K;

A : area della superficie di contatto tra stampo e pezzo, m^2 ;

T_1 : temperatura superficiale del corpo solido, K;

T_2 : temperatura del fluido, K.

L'analogia tra la relazione di Fourier (2.2), che riguarda il movimento di calore all'interno di un corpo solido, e la relazione di Newton (2.3), che riguarda il movimento di calore tra un corpo solido e un fluido è evidente. Va però sottolineata una sostanziale differenza: mentre il termine k che compare nella 2.2 è una proprietà del materiale, il termine α che compare nella 2.3 non è una proprietà del fluido, ma delle condizioni di deflusso.

La trasmissione del calore per irraggiamento avviene per propagazione di onde elettromagnetiche, analogamente alla propagazione della luce. Si ha trasmissione per irraggiamento nel vuoto o attraverso sostanze trasparenti (almeno in parte). Il flusso di energia radiante emesso (non scambiato, si noti) da un corpo nero (radiatore integrale) a temperatura assoluta T si esprime attraverso la relazione di Stefan Boltzmann:

$$q = \sigma_n A T^4 \quad (2.4)$$

In letteratura si trovano numerosi studi riguardanti lo scambio di calore per convezione e irraggiamento di un corpo solido immerso in un mezzo fluido. I termini delle equazioni 2.3 e 2.4 possono essere opportunamente sommati per esprimere il flusso termico totale scambiato dalla superficie:

$$\frac{q}{A} = HTC(T_1 - T_2) \quad (2.5)$$

Il termine HTC rappresenta l'inverso delle resistenza termica superficiale specifica, che è un parametro dipendente dalle composizione e condizioni di deflusso del mezzo fluido (per la sua componente convettiva) e dalla temperatura (per la sua componente radiante). Questo parametro, poco utile nello studio teorico dei problemi termici, risulta talvolta particolarmente utile in problemi pratici complessi per riassumere in quest'unico termine una serie di fattori difficilmente computabili singolarmente che intervengono nel trasferimento di calore [21].

2.2.2 Le proprietà termiche dei materiali

Come visto nelle equazioni 2.2 e 2.3, la quantità di calore scambiata tra due corpi è proporzionale alla differenza di temperatura tra le due superfici affacciate dei corpi. Tale differenza di temperatura varia nel

tempo man mano che i corpi scambiano calore in modo significativamente condizionato dalle proprietà termiche dei corpi stessi, in particolare dalla conducibilità termica specifica (k_s , W/m/K) e dalla capacità termica specifica (C_s , J/Kg/K).

La quantità di calore posseduta da un corpo ad una data temperatura dipende dalla sua capacità termica: tale grandezza equivale alla quantità di calore da fornire al corpo affinché esso aumenti la sua temperatura di 1 K. Per ciascun materiale, la capacità termica specifica è definita come la quantità di calore da fornire ad 1 Kg di materiale affinché esso aumenti la sua temperatura di 1 K. A parità di tutte le altre proprietà termiche, un corpo con maggior capacità termica esposto a una certa quantità di calore assorbe il calore in modo più rapido rispetto ad uno con capacità termica minore.

La quantità di calore trasmessa per unità di tempo, per unità di superficie trasversale, per unità di spessore dello strato e per differenza di temperatura unitaria all'interno di un materiale omogeneo si dice conducibilità termica specifica del materiale, si indica con la lettera k e ha come unità di misura nel SI il W/m/K. A parità di tutte le altre proprietà termiche, un corpo con maggior conducibilità termica specifica esposto a una certa quantità di calore assorbe il calore in modo più rapido rispetto ad uno con capacità termica minore [21,22].

2.2.3 Conduzione termica in regime variabile

In questa Sezione si tratta la conduzione termica in regime variabile non periodico: in particolare, verrà presentato il caso del corpo con resistenza interna trascurabile immerso istantaneamente in un fluido a temperatura diversa con il quale scambia calore attraverso convezione e irraggiamento. Un corpo può considerarsi a resistenza interna nulla, con campo termico uniforme entro il 5% quando il suo numero di Biot è minore di 0.1. La trattazione di questo caso offre numerosi spunti per affrontare il problema dello scambio termico tra stampi e pezzo nello stampaggio a caldo della lamiera.

T_i è la temperatura iniziale del corpo, di volume V e superficie di scambio termico A ; all'istante t_0 il corpo viene immerso in un fluido a temperatura T_f . Dal punto di vista matematico, questa situazione si descrive come una variazione a gradino delle condizioni al contorno. La soluzione del problema consiste nel calcolare la temperatura T (uniforme) del corpo, variabile nel tempo. Si può scrivere:

$$\alpha A (T_f - T) = C_s \rho V dT \quad (2.6)$$

dove il prodotto ρV rappresenta la massa del corpo e gli altri simboli hanno il significato spiegato nelle Sezioni precedenti. Supponendo costanti nel tempo e rispetto alla temperatura i valori dei parametri α , c , ρ , si possono separare le variabile temperatura e tempo e scrivere un'equazione la cui soluzione è:

$$T_f - T = (T_f - T_i) e^{-(\alpha A / C_s \rho V) t} \quad (2.7)$$

O in una forma alternativa:

$$T = T_i + (T_f - T_i) (1 - e^{t/\tau_0}) \quad (2.8)$$

$$\tau_0 = \frac{C_s \rho V}{\alpha A} \quad (2.9)$$

La costante τ_0 rappresenta, fisicamente, il tempo necessario affinché il corpo raggiunga la temperatura T_f nel caso in cui la velocità di variazione rimanesse quella iniziale, o anche il tempo necessario affinché la temperatura del corpo varii del 63.2% della totale escursione finale $(T_f - T_i)$ [23].

2.2.4 Il contatto termo-meccanico

Lo scambio termico tra due superfici a contatto dipende strettamente dalla morfologia del contatto stesso [24]. La superficie nominale di contatto si divide in due tipologie di regioni:

- regioni a contatto;
- regioni non a contatto;

L'entità di tali regioni dipende dalla microgeometria istantanea delle superfici a contatto [25], a sua volta determinata dalla rugosità superficiale dei corpi a contatto e dalla pressione locale di contatto. Nelle regioni a contatto, la resistenza termica superficiale è nulla e il problema termico si può ricondurre alla risoluzione dell'equazione della conduzione cui si impone una variazione a gradino delle condizioni al contorno, in questo caso imposte sulla temperatura superficiale. Nelle regioni non a contatto lo scambio termico avviene per convezione e irraggiamento: la distanza media tra le porzioni di superfici non a contatto è pari alla somma delle rugosità istantanee R_z di ciascuna

superficie, e l'entità di tale distanza determina la predominanza di un meccanismo di trasmissione rispetto ad un altro. La rugosità istantanea R_z dipende a sua volta dalla rugosità misurata, dalla durezza superficiale e dalla pressione di contatto.

Si può dunque affermare che tra due corpi di materiale dato posti a contatto lo scambio di calore è proporzionale alla pressione di contatto e all'inverso della somma delle rugosità R_z delle superfici [26].

2.2.5 Il coefficiente di scambio termico globale specifico apparente

Come visto nella Sezione 2.2.1 nel caso dell'equazione 2.5 per la resistenza termica superficiale specifica, anche nel caso di due corpi solidi a contatto si possono considerare globalmente i fenomeni di trasmissione del calore alla superficie d'interfaccia tra i due corpi, ed esprimere il trasferimento di calore da un corpo all'altro attraverso l'equazione:

$$\frac{q}{A} = HTC (T_1 - T_2) \quad (2.10)$$

dove il termine *HTC* (Heat Transfer Coefficient) si dice coefficiente di scambio termico globale specifico apparente, si esprime in $W/m^2/K$ ed è proporzionale al rapporto tra il flusso termico specifico e il potenziale termodinamico, ossia la differenza di temperatura tra le superfici.

Il *HTC* è un parametro complessivo in cui i contributi alla trasmissione del calore di conduzione, convezione e irraggiamento si sommano. L'entità di ciascun contributo dipende dalla morfologia del contatto, descritta nella Sezione 2.2.4.

Durante il processo di stampaggio a caldo della lamiera, i parametri che influenzano il *HTC* possono essere raggruppati in tre categorie [5]:

- parametri di processo: pressione di contatto, temperature iniziali dei corpi;
- condizioni d'interfaccia: rugosità, macro e micro geometria, presenza di lubrificante o di impurità;
- proprietà dei materiali: caratteristiche reologiche, proprietà termiche.

2.3 L'identificazione dei parametri per la simulazione del processo

Il recente sviluppo dell'informatica e il rinnovato interesse per le tecniche di calcolo numerico hanno reso possibile negli ultimi 20 anni lo sviluppo di programmi che permettono di modellare i processi industriali e di simularne l'evoluzione [27]. Questi programmi vengono utilizzati per la progettazione dei processi industriali al fine di limitare i costi nello sviluppo di nuovi utensili e di ottimizzare le prestazioni degli utensili stessi [28,29].

A fronte dei numerosi vantaggi in termini economici e di prestazioni rispetto ai processi tradizionali (elencati nella Sezione 2.1), lo stampaggio a caldo richiede una progettazione estremamente precisa degli stampi, in quanto il prodotto stampato è finito sia dal punto di vista geometrico che microstrutturale.

La simulazione numerica serve per prevedere l'evolvere del processo, individuare i punti caldi negli stampi, i punti troppo sollecitati, le regioni di eccessivo assottigliamento del pezzo, e soprattutto per evidenziare il ripercuotersi di queste eventuali anomalie sulle proprietà meccaniche del pezzo finito.

Per rispondere alle domande del progettista, il codice numerico deve considerare [3]:

- la dipendenza dei parametri del materiale dalla temperatura e dalla velocità di deformazione;
- la dipendenza del coefficiente di scambio termico dalle condizioni di processo;
- la dipendenza delle trasformazioni di fase dallo stato di sollecitazione termico e meccanico.

Per questi motivi la simulazione del processo di stampaggio a caldo necessita di un'analisi accoppiata termo-meccanica-metallurgica del problema, che necessita della conoscenza delle leggi fenomenologiche che descrivono i legami tra questi tre aspetti [5]. La generazione di dati accurati per la calibrazione di tali modelli è l'obiettivo principale di molti studi scientifici condotti in questo ambito.

I dati di input da inserire in un modello virtuale da risolvere attraverso l'analisi agli elementi finiti sono di tre tipi [3]:

- dati geometrici: forma e dimensione di tutti gli oggetti che intervengono attivamente nel processo;
- dati materiali: proprietà termiche e meccaniche che descrivono in modo esaustivo il comportamento dei materiali all'interno del campo di sollecitazione di interesse per l'applicazione;
- dati di interazione: leggi che descrivono il modo in cui i diversi oggetti interagiscono. Possono essere leggi d'attrito, criteri di rottura, leggi di scambio termico, ecc.

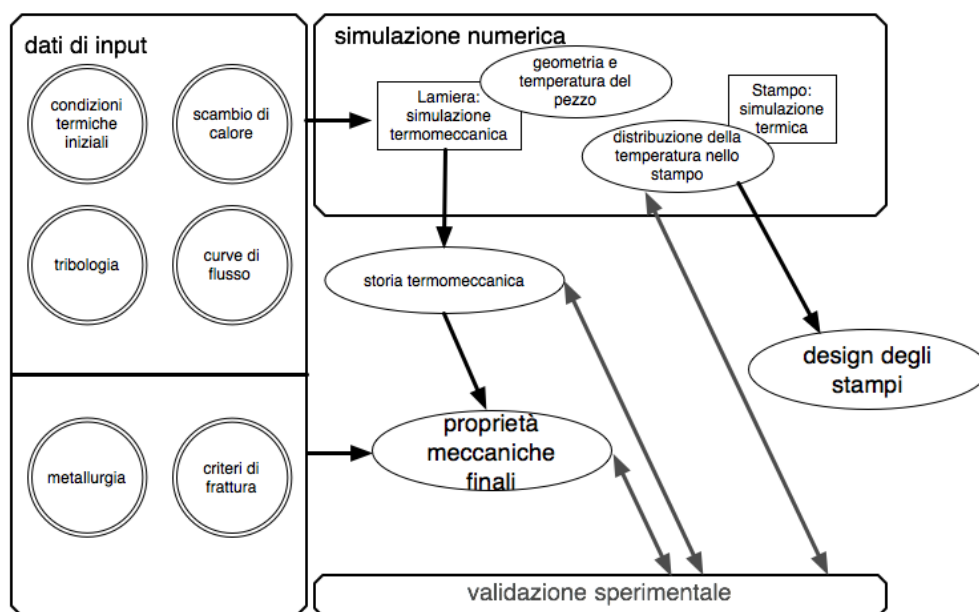


Fig. 2.4. Struttura tipica della simulazione agli elementi finiti per lo stampaggio a caldo.

Nelle seguenti sezioni sono descritte tre tecniche diverse utilizzate per l'identificazione di parametri, con esempi di applicazioni per la determinazione del HTC . La prima tecnica presentata si basa su delle misure di campo eseguite durante delle prove di laboratorio di stampaggio a caldo attraverso le quali si identifica analiticamente il HTC . La seconda è una tecnica largamente utilizzata, che utilizza delle strategie di ottimizzazione per la risoluzione di problemi agli elementi finiti posti in modo inverso; la terza tecnica proposta sfrutta il metodo analogico per la modellazione semplificata del problema dello scambio termico la cui soluzione è poi trovata per via analitica.

2.3.1 Identificazione analitica

Per determinare il HTC in prove di laboratorio di stampaggio a caldo della lamiera è stata sfruttata, in alcuni lavori che si riferiscono proprio allo Usibor [30], la soluzione dell'equazione di conduzione del calore per un corpo a resistenza interna trascurabile 2.2.3. La riconduzione delle prove a dei modelli matematici semplici presuppone l'adozione di accorgimenti tecnici e tecnologici specifici, che mirano a rendere la situazione reale del tutto simile a quella teorica descritta dall'equazione di cui si cerca la soluzione.

Per identificare il HTC è stato condotto un test di stampaggio durante il quale sono state rilevate le temperature del campione e degli stampi. Tali dati rilevati sono stati sfruttati per trovare il valore di HTC tra stampi e campione secondo la formula proposta: (2.11)

$$T(t) = T_{st.} + (T_{c.in.} - T_{st.}) e^{-\frac{HTC \cdot A}{C_s} t} \quad (2.11)$$

Dove:

$T(t)$: evoluzione della temperatura del campione;

$T_{st.}$: temperatura iniziale degli stampi;

$T_{c.in.}$: la temperatura iniziale del campione;

HTC : coefficiente di scambio termico, di cui si cerca il valore;

A : area apparente della superficie di contatto tra stampo e campione;

C_s : calore specifico del materiale degli stampi.

Con questa tecnica sono state identificati valori di HTC al variare della pressione di contatto, della temperatura e del tempo di austenizzazione per campioni in Usibor stampati con acciaio da stampaggio a caldo. Le pressioni indagate variano dagli 0 MPa agli 40 MPa, che delimitano il campo di pressioni solitamente riscontrabile industrialmente nei processi di stampaggio a caldo dello Usibor [31].

Tecniche simili a quella descritta sono utilizzate per l'identificazione del HTC [32,33], specialmente in processi di forgiatura massiva: in questi casi sono proposte delle linee guida alla progettazione dei test per la raccolta dei dati [34] che forniscono importanti indicazioni sulla collocazione dei punti di misura della temperatura su stampo e campione, sugli strumenti da utilizzare e sulle loro modalità d'utilizzo.

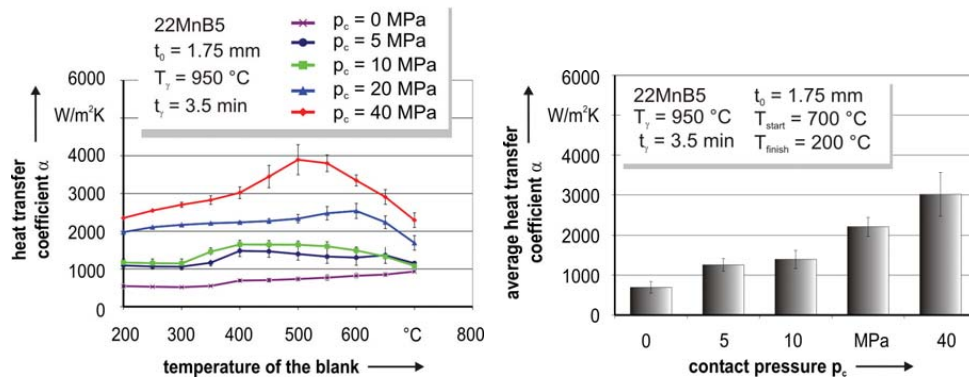


Fig. 2.5. Valori di HTC al variare della pressione di contatto [30].

2.3.2 L'analisi inversa

Al fine di individuare dati certi da inserire come input delle analisi di modelli agli elementi finiti (problema diretto), viene spesso usata la tecnica dell'analisi inversa [35]. Questa tecnica prevede la realizzazione parallela di un test sperimentale e di una simulazione numerica: le misurazioni eseguite sul test sperimentale forniscono i dati di input della simulazione ed un dato confrontabile col risultato della simulazione e in grado quindi di stimarne la qualità. Un parametro della simulazione, l'oggetto dell'analisi inversa, viene fatto variare fintantoché il risultato della simulazione stessa coincide con quello del test reale. In questo modo viene identificato un parametro necessario alla corretta impostazione della simulazione e non misurabile in modo diretto.

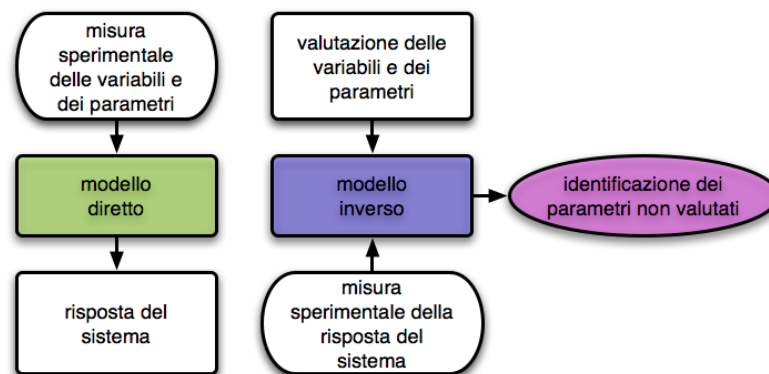


Fig. 2.6. Confronto tra problema diretto ed inverso.

L'analisi inversa viene utilizzata per individuare leggi che descrivono il comportamento plastico dei materiali e leggi di flusso: in questi casi le leggi hanno espressione anche molto complessa e i coefficienti da inserire in essi vengono calcolati attraverso procedure che si avvalgono di tecniche di ottimizzazione multiobiettivo [35,36]. Dal punto di vista matematico, un sistema fisico si può descrivere attraverso un modello che esprime la risposta del sistema (M^c) in funzione dei parametri che descrivono il sistema e tenendo conto delle condizioni al contorno. In formule:

$$M^c = S(x) \quad (2.12)$$

dove x rappresenta i parametri che descrivono il sistema e S è detto operatore diretto. Il problema inverso, invece, richiede di individuare i valori dei parametri (x) che permettono al sistema di fornire una risposta (M^c) equivalente a quella misurata sul sistema fisico (M^{Exp}). In formule:

$$x = S^{-1}(M^c) \quad (2.13)$$

$$M^c = M^{Exp} \quad (2.14)$$

Le condizioni di risoluzione dell'equazione 2.13 sono:

- esiste una soluzione al problema per ogni risposta M possibile;
- la soluzione è unica nello spazio dei parametri x del modello;
- la risposta M del sistema è continua nello spazio dei parametri x .

Il problema dell'identificazione di parametri [37, 38] è un problema d'analisi inversa che consiste nel trovare i valori dei parametri x che minimizzano la differenza calcolata tra M^c e M^{EXP} . In formule si può scrivere:

$$M_i^{EXP} = M_i^c + \lambda_i i = 1 : s \quad (2.15)$$

Oppure, introducendo un fattore moltiplicativo β che "pesa" le risposte del sistema secondo considerazioni fisiche, si definisce la funzione obiettivo da minimizzare come:

$$Q(M^c, M^{EXP}) = \sum_{i=1}^s \beta_i (M_i^{EXP} - M_i^c)^2 \quad (2.16)$$

dove β è lo scarto tra le corrispondenti risposte del sistema misurate e calcolate, tenendo conto delle approssimazioni numeriche, delle incertezze di misurazione e dello scostamento tra modello matematico e reale dovuto a semplificazioni e assunzioni.

2.3.3 Le tecniche di ottimizzazione

Il problema della ricerca del minimo di una funzione è molto ricorrente nel campo della fisica e della matematica [39, 40]; laddove il minimo non è individuabile per via analitica si ricorre alle tecniche di minimizzazione numerica. Detto P un problema ed α una sua soluzione (o un suo minimo) il metodo numerico di ottimizzazione consiste in un procedimento iterativo che genera una successione x_k convergente ad α .

I problemi di minimizzazione più semplici sono quelli in una variabile, detti monodimensionali: le più note tecniche di risoluzione di questi problemi sono i metodi diretti (senza calcolo della derivata) della bisezione sequenziale, di Fibonacci e della sezione aurea, ed i metodi di interpolazione polinomiale. L'ottimizzazione può essere vincolata o meno, a seconda che si possa fissare un dominio di ricerca non infinito entro cui si trova il minimo della funzione: generalmente i vincoli semplificano di molto la ricerca del minimo e la rendono decisamente efficiente.

Per l'ottimizzazione relativa alla risoluzione di problemi di analisi inversa, si fa spesso ricorso ad algoritmi misti, che limitano il numero di iterazioni e consentono di eseguire un numero ridotto di simulazioni. Infatti, nell'impossibilità di disporre di una espressione analitica che esprime l'andamento della funzione da minimizzare rispetto alla variabile oggetto dell'identificazione, è necessario compiere per ciascun valore tentativo della variabile una simulazione numerica che fornisca il valore della funzione obiettivo.

Per l'identificazione presentata (Sezione 4) si è utilizzato un algoritmo misto basato sul metodo della *regula falsi*: si scelgono due valori di innesco (x_0 ed x_1) e vengono calcolati i valori della funzione ($Q(x_1)$ e $Q(x_2)$). Il terzo valore della serie x_k convergente ad α (che nei problemi di minimizzazione corrisponde al valore di x per cui la funzione $Q(x)$ assume il suo minimo) è individuato dall'intersezione dell'asse delle ascisse con la retta passante per i punti $(x_0, Q(x_0))$ e $(x_1, Q(x_1))$.

Per problemi di minimizzazione, è possibile, col procedere delle iterazioni e il disporre via via di un numero maggiore di punti $(x_i, Q(x_i))$, individuare il termine $(k+1)$ -esimo della serie come il vertice della parabola passante per i punti $(x_{k-2}, Q(x_{k-2}))$, $(x_{k-1}, Q(x_{k-1}))$ e $(x_k, Q(x_k))$. La convergenza, a seconda della forma della funzione Q , può essere migliore localmente utilizzando il procedimento iterativo di un tipo piuttosto che dell'altro.

2.3.4 Il metodo analogico

Il metodo analogico permette di utilizzare conoscenze che vengono dallo studio dei circuiti elettrici per risolvere problemi di trasmissione del calore [41]. Prima dell'avvento dei computer digitali (negli anni 50 e 60 del secolo scorso soprattutto) molti problemi termici venivano affrontati in questo modo: così le leggi di Fourier e della continuità che descrivono un problema termico in regime non stazionario trovano soluzione attraverso la risoluzione delle equazioni di Ohm e di Coulomb che descrivono il transitorio del circuito elettrico analogo. L'analogia tra leggi che descrivono un circuito elettrico e leggi che descrivono il trasporto di calore implica di stabilire delle analogie tra grandezze elettriche e grandezze termiche, come riportato in tabella 2.3.4.

Gr. termica	Gr. elettrica
temperatura	differenza di potenziale
flusso termico	corrente elettrica
resistenza termica	resistenza elettrica
capacità termica	capacità elettrica

Table 2.2. Analogia tra grandezze termiche ed elettriche.

Modellando il problema termico dello scambio di calore tra due corpi, la differenza di temperatura tra i due corpi può quindi essere considerata come la differenza di potenziale imposta da un generatore, la capacità termica dei due corpi come la presenza di due condensatori, la loro resistenza interna come una resistenza elettrica e la resistenza termica superficiale (l'inverso del coefficiente di scambio termico globale) come una resistenza aggiuntiva da inserire in serie nel circuito. Considerando un problema di conduzione termica monodimensionale senza generazione interna di calore, il campo termico sul dominio considerato è governato dall'equazione:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.17)$$

dove a è la diffusività termica.

Consideriamo poi il problema elettrico di un filo conduttore con resistenza specifica per unità di lunghezza r' e capacità specifica per unità di lunghezza c' , privo di autoinduzione e di conduttanza di dispersione. Per un tratto infinitesimo del filo si può scrivere, combinando le equazioni che esprimono la differenza di potenziale e l'intensità di corrente:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{r' c'} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad (2.18)$$

Si nota immediatamente che la 2.17 e la 2.18 sono formalmente uguali, e quindi la soluzione del problema termico potrà essere trovata come soluzione del circuito elettrico cui la 2.18 si riferisce.

La forza del metodo analogico risiede nell'impossibilità di realizzare una distribuzione uniforme e continua della capacità elettrica: esse deve essere rappresentata da un numero finito di condensatori localizzati, sostituendo di fatto il modello elettrico descritto dalla 2.18 (e quello termico descritto dalla 2.17) con un modello a parametri concentrati di più facile (anche se approssimata) risoluzione. Di fatto, il metodo analogico equivale all'applicazione al problema termico del metodo delle differenze finite, largamente utilizzato nei codici FE.

Prove sperimentali

L'obiettivo dei test e dell'analisi dei risultati è quello di identificare i valori di HTC al variare della pressione di contatto per diversi accoppiamenti di materiali. La scelta dei materiali tiene conto dello stato dell'arte del processo industriale e delle innovazioni che si possono apportare alla luce dello sviluppo di materiali ceramici innovativi [42–45]. Il processo standard considerato è quello per la lavorazione dello Usibor 1500P[®] in forma di lamiera da 1.5 mm di spessore.

Nel test sono replicate le condizioni di processo, in quanto il HTC è significativamente influenzato da esse [46], cercando inoltre di facilitare la raccolta dei dati di input per l'analisi inversa e di garantire la massima ripetibilità dei test stessi.

Nelle sezioni che seguono è riportata la descrizione della procedura di test, della campagna sperimentale, delle misure effettuate, del campione utilizzato per la prova, degli utensili da stampaggio utilizzati e dell'interpretazione dei dati rilevati.

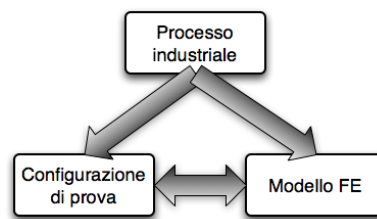


Fig. 3.1. Logica di progettazione del test.

3.1 La prova

Il test [47,48] ha come obiettivo la rilevazione di dati per l'identificazione del *HTC*: viene condotto attraverso lo stampaggio piano in assenza di deformazione plastica di un campione precedentemente austenitizzato in forno [17]. Durante il test viene monitorato il campo termico interno agli stampi attraverso 5 termocoppie [49] in esso alloggiare ed il campo termico del campione a inizio stampaggio grazie ad una termocamera a raggi infrarossi (descritta nella Sezione 3.1.3).

Il test deve garantire un elevato grado di ripetibilità ed essere condotto in condizioni simili a quelle industriali, in quanto il *HTC* è un parametro di processo che risente molto delle condizioni di conduzione della prova.

I test sono stati condotti sulla base di un piano di esplorazione diretta delle pressioni di contatto, con ripetizione del test per una sua più corretta interpretazione e per l'analisi di eventuali anomalie nella conduzione o nella misura.

Completato il piano sperimentale di test di identificazione, sono state condotte delle analisi del materiale stampato per avere un'ulteriore validazione sull'identificazione eseguita.

Nei prossimi paragrafi verrà descritta la procedura di conduzione del test, le misure effettuate ed il piano sperimentale adottato.

3.1.1 La conduzione della prova

Il test prevede il riscaldamento del campione alla temperatura di 950 °C all'interno di un forno: il riscaldamento avviene con velocità inferiore ai 12 °C/s per evitare il danneggiamento del rivestimento e il tempo di permanenza in forno è di 6 min, sufficiente all'omogeneizzazione completa della temperatura senza indurre un indesiderato accrescimento del grano cristallino.

Il campione viene estratto dal forno mediante un dispositivo apposito, attraverso il quale si posiziona poi il campione tra gli stampi, equidistante 1 mm dagli stessi (figura 3.4): il piano di simmetria trasversale del campione coincide con il piano di misura definito dalle giunzioni calde delle termocoppie (figura 3.6). L'operazione di trasferimento deve essere molto rapida, per evitare un eccessivo decadimento

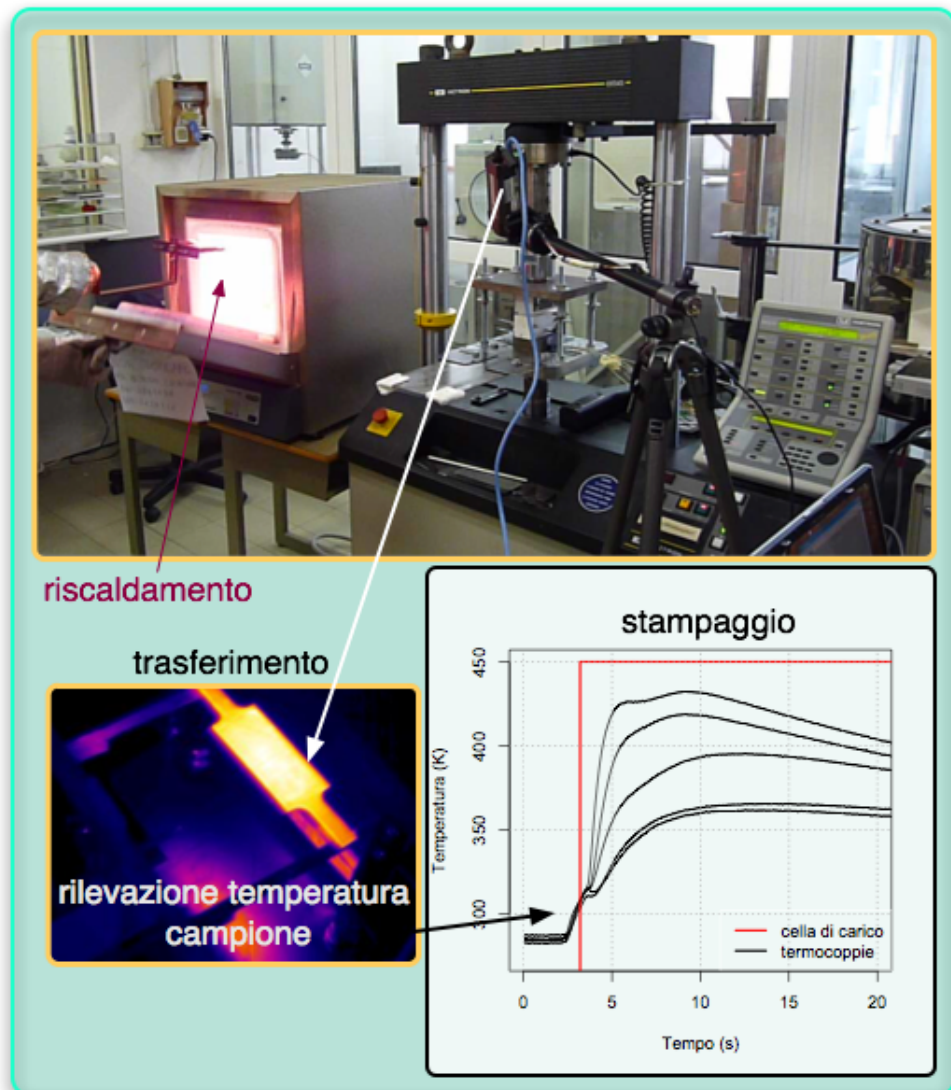


Fig. 3.2. Procedura di conduzione del test e rilievo delle grandezze per l'identificazione.

di temperatura [50]. La distanza del campione dagli stampi è la minima possibile, per ridurre il tempo tra la rilevazione del campo termico del campione e la chiusura degli stampi e per fare sì che lo scambio termico tra stampi e campione sia dovuto in gran parte alla convezione rispetto all'irraggiamento [23].

L'approccio degli stampi al campione è considerato simmetrico, visto che la velocità di applicazione del carico (la pressa utilizzata consente

una velocità di spostamento di 20 mm/s) consente di avere un tempo di ritardo tra il contatto del campione con lo stampo superiore e quello con lo stampo inferiore di 0.05 s .

Il dispositivo di stampaggio utilizzato (figura 3.3) su cui sono montati gli stampi assicura il perfetto parallelismo tra le superfici degli stampi ed il campione, distribuendo in modo omogeneo la pressione sull'intera area di contatto.

Il test si conclude dopo 40 s dall'istante di chiusura degli stampi.

3.1.2 Apparecchiatura di prova e sistemi di acquisizione

Per il riscaldamento del campione è stato utilizzato un forno a muffola Nabertherm HTC 08/15 con resistenze riscaldanti in SiC, della

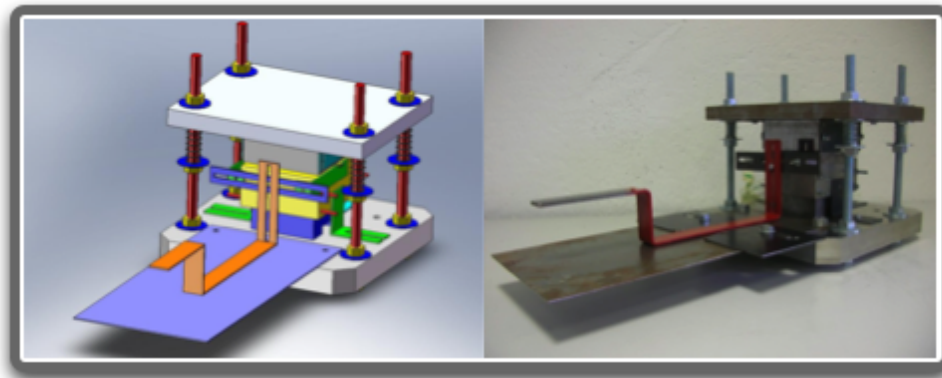


Fig. 3.3. Setup di prova con dispositivo di afferraggio e posizionamento del campione.

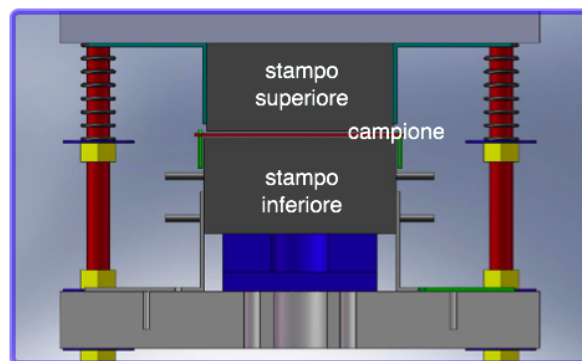


Fig. 3.4. Dettaglio della sospensione del campione tra gli stampi prima della loro chiusura.

potenza di 13 kW, temperatura massima raggiungibile di 1500 °C. La camera interna del volume di 8 litri consente una agevole estrazione del campione, con perdite di temperatura contenute all'apertura. Il forno è collocato in posizione prossima alla pressa, con apertura rivolta in direzione opposta per evitare che all'apertura venga alterata la temperatura ambientale in prossimità degli stampi.

La pressa utilizzata per i test è una Instron 8516 da 100 kN, sulla quale è stato montato il sistema di stampaggio riportato in figura 3.3. Il carico viene trasferito agli stampi mediante il sistema riportato in figura 3.5. Questo accorgimento tecnico permette di garantire:

- la ripetibilità di posizionamento iniziale degli stampi;
- il parallelismo delle superfici degli stampi a contatto col campione;
- il posizionamento del campione preciso e ripetibile.

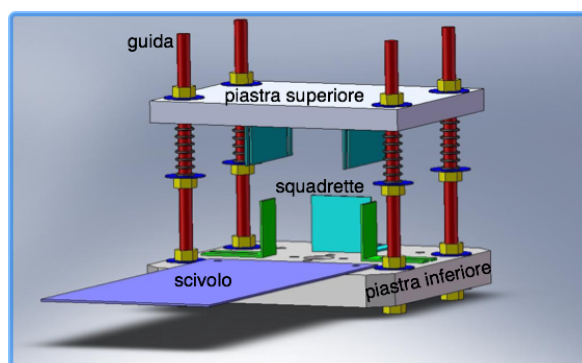


Fig. 3.5. Disegno del dispositivo di sospensione e movimentazione degli stampi.

Il dispositivo di sospensione e movimentazione degli stampi mantiene la distanza tra gli stampi al valore di 3.5 mm attraverso 4 molle montate sulle guide di scorrimento. La discesa dello stampo superiore lungo le guide è indotta dal carico applicato dalla pressa senza connessione rigida: in questo modo la piastra di fissaggio dello stampo superiore rimane basculante, garantendo il parallelismo tra gli stampi e rispetto al campione. Sulla piastra inferiore del dispositivo sono montate le squadrette di posizionamento dello stampo e lo scivolo per il dispositivo di trasferimento del campione.

L'acquisizione delle termocoppie e della cella di carico montata sulla pressa viene effettuata attraverso un sistema di acquisizione Agilent 34980A su cui è montato un modulo multiplexer a bassa frequenza

34921A che permette una risoluzione di rilevazione su 6 canali alla frequenza di 100 Hz di 0.1°C . I dati rilevati vengono salvati su file attraverso un programma dedicato sviluppato in ambiente NI LabVIEW appositamente per questa applicazione.

L'immagine termografica rilevata dalla termocamera è elaborata da un software dedicato che permette di effettuare filmati che possono essere salvati e processati in seguito. Il software consente la sincronizzazione della termocamera con il dispositivo di acquisizione delle termocoppie e della cella di carico, in modo da disporre di tutti i dati rilevati su una stessa scala temporale riferita.

3.1.3 Le misure

Per la misura del campo termico interno allo stampo sono state utilizzate termocoppie di tipo K, Chromel (Ni-Cr, +), Alumel (Ni-Al, -), con intervallo di misura da -200°C a 1260°C , con sensibilità di $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. La giunzione calda è di dimensioni ridotte (1.2 mm il diametro medio) per aumentare la prontezza di risposta nella misura. Il posizionamento della giunzione calda è stato eseguito senza incollaggi, per evitare interferenze nella misura, ed è mantenuto nel corso dei test da 3 punti di fissaggio con loctite della guaina alla cava posti prossimamente al punto di misura ad una distanza dalla superficie non inferiore ai 4 mm.

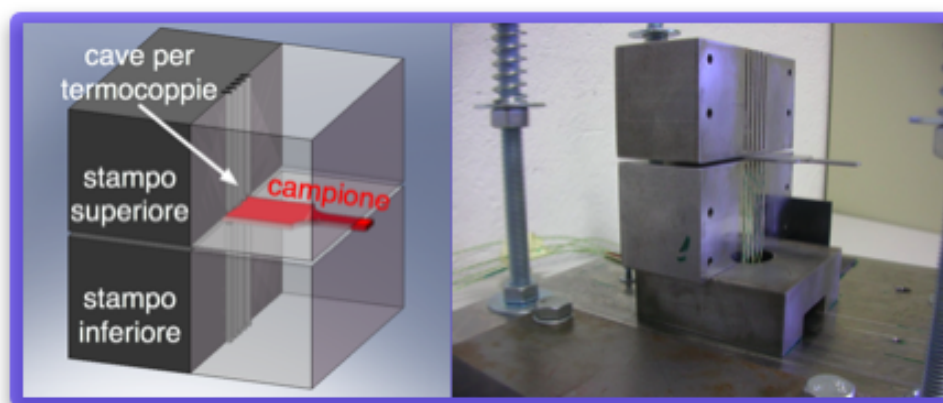


Fig. 3.6. Dettaglio della posizione relativa tra campione, stampi e termocoppie.

La misura del campo termico del campione nell'istante di chiusura degli stampi è stata eseguita in modo indiretto rilevando con una termocamera a raggi infrarossi la temperatura del campione nell'istante di ingresso tra gli stampi. Considerando questo istante come iniziale per lo scambio di calore tra campione e stampi e misurando il tempo trascorso fino alla chiusura degli stampi, è stata eseguita una simulazione agli elementi finiti che stima l'evoluzione del campo termico del campione sulla base del suo ripercuotersi sul campo termico dello stampo.

L'immagine termografica (Figura 3.7) è ottenuta grazie ad una termocamera Flir A325, con frequenza di acquisizione di 50 Hz che permette di cogliere il campione in movimento. La stima dell'emissività dell'acciaio è stata eseguita su un campione riscaldato in forno a 1200 °C e lasciato raffreddare misurando la sua temperatura con una termocoppia a contatto di tipo K. L'emissività media calcolata nell'intervallo di temperatura compreso tra 700 °C e 900 °C è di 0.92.

La misura del carico applicato agli stampi e quindi della pressione di contatto sul campione è eseguita mediante la cella di carico montata a bordo della pressa ed acquisita in modo sincronizzato con termocoppie e termocamera: ciò permette di riferire gli istanti di ingresso del lamierino, di chiusura degli stampi e l'evoluzione del campo termico ad una stessa scala temporale.

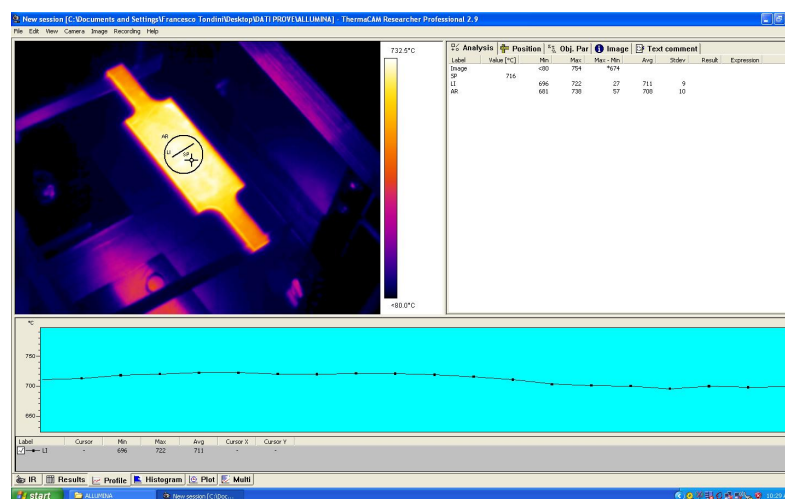


Fig. 3.7. Rilevazione della temperatura di ingresso del campione mediante termocamera.

3.1.4 Il piano sperimentale

Il piano di prove prevede l'esecuzione di test a 5 livelli di pressione, come riportato in tabella 3.1.4. Per ciascun livello di pressione si sono ripetuti 5 test a variazione libera controllata della temperatura iniziale del campione [51].

Il piano sperimentale è stato eseguito bloccando l'accoppiamento di materiali e eseguendo le prove all'interno del blocco in ordine casuale.

Pressione	MPa	5	10	20	30	40
Forza applicata	kN	8.975	17.950	35.900	53.850	71.800

Table 3.1. Valori di pressione e carico applicato nei test.

Il test, della durata di 40 s, è succeduto da un tempo di riposo di circa 40 min che permette il ritorno degli stampi a temperatura ambiente: questo accorgimento minimizza l'effetto dello scambio termico tra stampo e ambiente sul raffreddamento del campione.

Il disporre di 5 ripetizioni di ciascun test permette in primo luogo di selezionare le prove migliori ed inoltre di effettuare delle importanti considerazioni sugli errori sistematici e casuali, come presentato in modo esteso nella Sezione 3.4.

3.2 Il campione

L'industria automobilistica mondiale adotta come materiale standard per la produzione di componenti attraverso stampaggio a caldo una lamiera rivestita, che ha come materiale base il 22MnB5 (presentato in 2.1.4) e come rivestimento una combinazione di ossidi di alluminio e silicio: questo materiale è brevettato da *ArcelorMittal*TM col nome di Usibor. Il rivestimento, di spessore compreso tra i 23 μm ed i 32 μm serve a preservare il materiale dall'ossidazione a caldo durante l'operazione di trasferimento, così da permettere la produzione di pezzi dalla buona finitura superficiale, che non richiedono successivi trattamenti (sabbiatura o altri).

Proprietà	Unità di misura	Valore	Intervallo (°C)
E	GPa	210	[20,1200]
C_s	J/kg/K	$425 + 7.73 \times 10^{-1}T - 1.69 \times 10^{-3}T^2 +$ $+ 2.22 \times 10^{-6}T^3$	[20,600]
		$666 + 13002/(738 - T)$	(600,735]
		$545 + 17820/(T - 731)$	(735,900]
		650	(900,1200]
K	W/m/K	$54 - 3.33 \times 10^{-2}T$ 27.3	[20,800] (800,1200]
α	–	$-2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5}T + 0.4 \times 10^{-8}T^2$	[20,750]
		1.1×10^{-2}	(750,860]
		$-6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5}T$	(860,1200]
ρ	kg/m ³	7860	[20,1200]

Table 3.2. Proprietà dello Usibor 1500P®

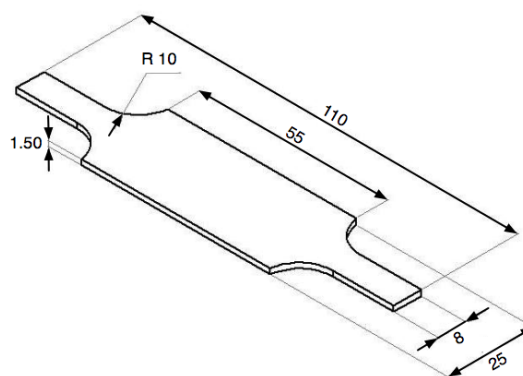


Fig. 3.8. Disegno del campione di prova utilizzato.

Le dimensioni del campione (Figura 3.8) permettono l'applicazione di una pressione massima di circa 55 MPa al valore di forza applicata di 100 KN (massima consentita dalla pressa utilizzata). La superficie del campione è di 1875 mm^2 e la sua impronta sugli stampi nel corso della prova di 1795 mm^2 .

Il numero di Biot associato al campione durante il suo trasferimento dal forno alla pressa è calcolato sulla base dei dati ricavati da Figura 3.9 risolvendo il sistema:

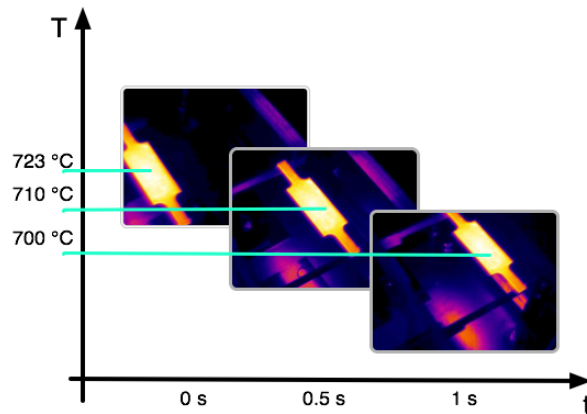


Fig. 3.9. Stima del coefficiente di scambio termico in aria per il calcolo del numero di Biot.

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (3.1)$$

$$Q_1 - Q_2 = \rho C V (T_1 - T_2) \quad (3.2)$$

$$Q_1 - Q_2 = \alpha A (T_1 - T_2) \quad (3.3)$$

da cui:

$$\alpha = 300 \text{ W/m}^2/\text{K};$$

$$Bi = 0.01$$

Il calcolo del numero di Biot è effettuato considerando le proprietà del materiale nell'intervallo di decadimento di temperatura rilevato dalla termocamera (vedere Tabella 3.2).

Per corpi aventi numero di Biot inferiori a 0.1 la temperatura su tutto il dominio può essere considerata uniforme entro il 5%: ciò sarà sfruttato per giustificare delle assunzioni fatte nell'identificazione.

Unità di misura		Valore	Intervallo (°C)
Peso	Kg	0.021	[20-1200]
Bi	–	0.01	[700-750]
R_d	μm	1.76	[20,1200]
R_z	μm	13.1	[20,1200]

Table 3.3. Proprietà del campione.

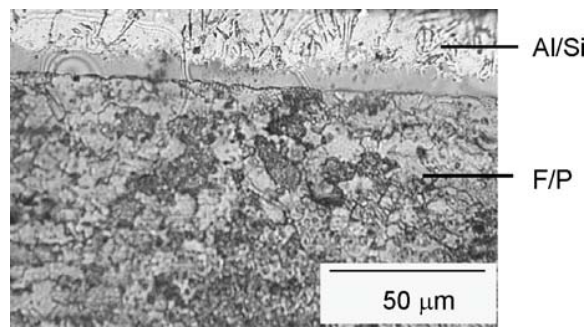


Fig. 3.10. Micrografia della lamiera in Usibor 1500P[®] con in evidenza il rivestimento superficiale.

3.3 Gli stampi

L'impiego di materiali ceramici ad elevate prestazioni meccaniche per la produzione di stampi può differenziare il trattamento termico in stampo e migliorarne il controllo, permettendo, potenzialmente, la produzione di componenti a microstruttura non martensitica (ferritico-perlitica oppure parzialmente bainitica) oppure con gradienti microstrutturali. Componenti di questo tipo sono richiesti in tutti i casi in cui l'assemblaggio del componente nell'assieme richiede la saldatura o la bullonatura, in quanto le zone di connessione in questi casi non possono avere microstruttura martensitica.

Per questi motivi si è deciso di testare come materiali da stampi dei ceramici, che coniugano proprietà meccaniche molto elevate a proprietà termiche che prospettano un raffreddamento del pezzo a contatto con lo stampo molto lento rispetto a ciò che avviene con l'utilizzo dell'acciaio.

Nelle prossime sezioni sono descritte la geometria degli stampi e le caratteristiche più importanti di allumina, macor e zirconia parzialmente stabilizzata (zirconia p.s.), che sono i tre materiali ceramici scelti per i test.

3.3.1 Geometria degli stampi

Sono stati utilizzati stampi piani, a forma di parallelepipedo di lati 100 mm per 100 mm per 50 mm. Ciascuno stampo (superiore ed inferiore, secondo la loro collocazione rispetto al campione, come mostrato in Figura 3.4) si compone di due metà che vengono assemblate mediante

barre filettate passanti. Ciascuna metà, come da Figura 3.6, presenta 5 cave semicilindriche praticate sul piano di accoppiamento che consentono la collocazione di 5 termocoppie con punto di misura prossimo al piano di contatto col campione. La composizione dello stampo in due metà aumenta la precisione di collocazione delle giunzioni delle termocoppie e ne permette la verifica dell'esatta posizione dopo l'esecuzione dei test.

Le dimensioni degli stampi conferiscono agli stessi una capacità termica totale molto elevata rispetto al campione e rendono il raffreddamento dello stesso poco sensibile alle condizioni di convezione sui bordi dello stampo.

Le cave di adduzione delle termocoppie, del diametro di 2 mm (complessivo, a stampo assemblato), alloggiavano le termocoppie creando una leggera interferenza che limita la presenza all'interno dello stampo di sacche d'aria che potrebbero influenzare la distribuzione del flusso termico. Le 5 termocoppie sono poste a differenti distanze dal piano di contatto col campione: 0.5 mm la termocoppia centrale (A), 1 mm le termocoppie laterali interne (C) poste simmetricamente a 5 mm dalla termocoppia centrale, e 1.5 mm le termocoppie laterali esterne (B), poste simmetricamente a 10 mm. Il piano individuato dai 5 punti di misura corrisponde al piano di simmetria per stampi e campione (Figura 3.15) ed in seguito verrà menzionato come piano di misura.

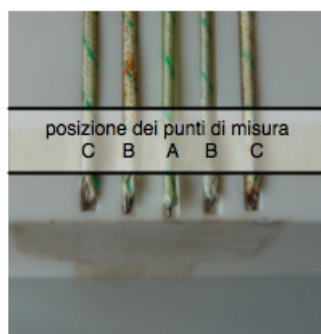


Fig. 3.11. Dettaglio dei punti di misura.

3.3.2 L'acciaio per stampi

Il processo di riferimento considerato prevede l'utilizzo di un acciaio Bohler W300 [52], di composizione chimica media riportata in Tabella 3.3.2. Si designano come acciai per lavorazioni a caldo gli acciai da utensili destinati alla deformazione a caldo di metalli e le loro leghe mediante procedimenti di stampaggio, estrusione, pressofusione. Vengono sottoposti in servizio, a sollecitazioni meccaniche cicliche a temperature superiori ai 250 °C.

C	Cr	Mo	V	Si
0.38	5.00	1.30	0.40	1.10

Table 3.4. Composizione chimica dell'acciaio per lavorazioni a caldo Bohler W300 [52]

acciaio W300		
E	GPa	210
C_s	J/kg/K	$450 + 0.28T - 2.91 \times 10^{-4}T^2 + 1.34 \times 10^{-7}T^3$
K	W/m/K	$27 + 6 \times 10^{-3}T$
α	1/K	13.3×10^{-6}
ρ	kg/m ³	7750
peso (1 stampo)	Kg	3492
C	J/K	1570
R_a	μm	0.25
R_z	μm	3.90

Table 3.5. Proprietà termiche e meccaniche dello stampo in acciaio [52].

3.3.3 Materiali ceramici

I materiali ceramici scelti per essere qualificati sono l'allumina (pura al 99.5 %), il macor e la zirconia parzialmente stabilizzata [53].

L'allumina è un materiale largamente conosciuto, abbastanza tenace e dalle buone caratteristiche meccaniche. Le sue proprietà termiche non sono estreme per essere un ceramico, tanto da essere confrontabili con quelle dell'acciaio per stampi.

allumina		
E	GPa	360
C_s	J/kg/K	510
K	W/m/K	19
α	1/K	7.7×10^{-6}
ρ	kg/m ³	3850
peso	Kg	1902
C	J/K	685
R_a	μm	1.36
R_z	μm	12.10

Table 3.6. Proprietà termiche e meccaniche dello stampo in allumina [54].

Il Macor è un materiale utilizzato per la produzione di componenti meccanici che devono sopportare sollecitazioni anche gravose. E' un materiale lavorabile alle macchine utensili, stabile fino a temperature superiori ai 1000 °C ed utilizzato per applicazioni mediche, aerospaziali e nucleari in cui l'isolazione termica da parte del componente è richiesta.

SiO_2	MgO	Al_2O_3	K_2O	B_2O_3	F
46	17	16	10	7	4

Table 3.7. Composizione chimica del macor [55].

La zirconia parzialmente stabilizzata (zirconia p.s.) è un materiale dalle elevate proprietà meccaniche, ottenute attraverso stabilizzazione parziale mediante aggiunta di ossido di ittrio (Y_2O_3) [56].

macor		
E	GPa	67
C_s	J/kg/K	790
K	W/m/K	1.46
α	1/K	9.3×10^{-6}
ρ	kg/m ³	2520
peso	Kg	1256
C	J/K	992
R_a	μm	0.61
R_z	μm	7.00

Table 3.8. Proprietà termiche e meccaniche del macor.

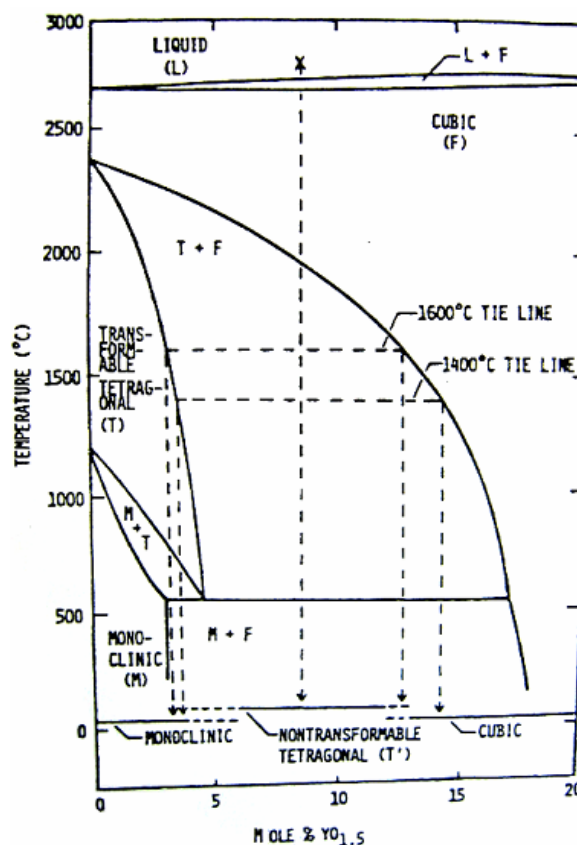
L'ossido di zirconio (ZrO_2) è un materiale che ha pressione ambiente presenta tre fasi stabili:

- monoclina (baddelite): stabile fino a 1170 °C;
- tetragonale : stabile fino a 2370 °C;
- cubica: stabile fino alla temperatura di fusione (2680 °C);

La trasformazione tetragonale-monoclina è di tipo martensitico, con aumento di volume del 3-5 %. L'aggiunta di ossido di Ittrio rende stabile la fase tetragonale a temperatura ambiente, come mostrato dal diagramma di fase (Figura 3.12). La trasformazione di fase da tetragonale a monoclina si verifica a temperature inferiori a 550 °C all'apice delle cricche in fase di propagazione grazie agli sforzi di trazione presenti. L'aumento di volume conseguente alla trasformazione genera di contro uno sforzo di compressione che ostacola il propagarsi della cricca e migliora sensibilmente le proprietà meccaniche del materiale. La scelta della zirconia p.s. rispetto a quella completamente stabilizzata, che ha proprietà termiche più estreme, deriva dal fatto che la stabilizzazione parziale offre migliori proprietà di resistenza meccanica.

3.4 I dati rilevati

I dati rilevati durante i test sono:

Fig. 3.12. Diagramma di stato del sistema ZrO_2 - Y_2O_3 .

ZrO_2	Y_2O_3	Al_2O_3
95.5	4.0	0.5

Table 3.9. Composizione chimica della zirconia p.s. [57].

- istante di ingresso del campione tra gli stampi (t_0);
- temperatura di ingresso del campione all'istante t_0 ;
- istante di chiusura stampi;
- evoluzione di temperatura all'interno degli stampi in 5 punti di rilevazione;
- microdurezza del campione stampato sulla sezione mediana trasversale (Figura 3.15).

I test sono ripetuti 4 volte per ciascun livello di pressione, e le misurazioni di temperatura all'interno dello stampo sono ridondanti: ciò

zirconia p.s.		
E	GPa	210
C_s	J/kg/K	400
K	W/m/K	2.5
α	1/K	10.4×10^{-6}
ρ	kg/m ³	6040
peso	Kg	2980
C	J/K	1192
R_a	μm	0.11
R_z	μm	1.30

Table 3.10. Proprietà termiche e meccaniche della zirconia p.s. [57].

permette un'analisi della qualità dei dati rilevati, con individuazione di eventuali anomalie nel posizionamento delle termocoppie e nella conduzione della prova. I dati rilevati nel corso del test, riportati in Figura 3.13 vengono selezionati e trattati per essere utilizzati per l'identificazione secondo i criteri esposti nella prossima Sezione.

3.4.1 L'interpretazione dei dati rilevati

I dati rilevati nel corso del test possono essere affetti da errori derivanti da:

- imprecisioni di lavorazione dei fondi cava nello stampo;
- imprecisioni di collocazione delle giunzioni calde delle termocoppie;
- problemi di movimentazione del campione;
- problemi di posizionamento del campione;

Le prime due cause originano un errore sistematico che affligge tutti i test di uno stesso blocco (condotti su uno stesso accoppiamento di materiali), mentre le altre due cause originano un errore casuale. Un esempio di errore sistematico si può apprezzare in Figura 3.14: in tutte le ripetute, la temperatura rilevata dalla termocoppia laterale destra è superiore rispetto a quella rilevata dalla termocoppia laterale sinistra. La differenza tra i profili di temperatura è pressoché costante nelle 4 ripetute: tale differenza è dovuta in parte all'imprecisione della

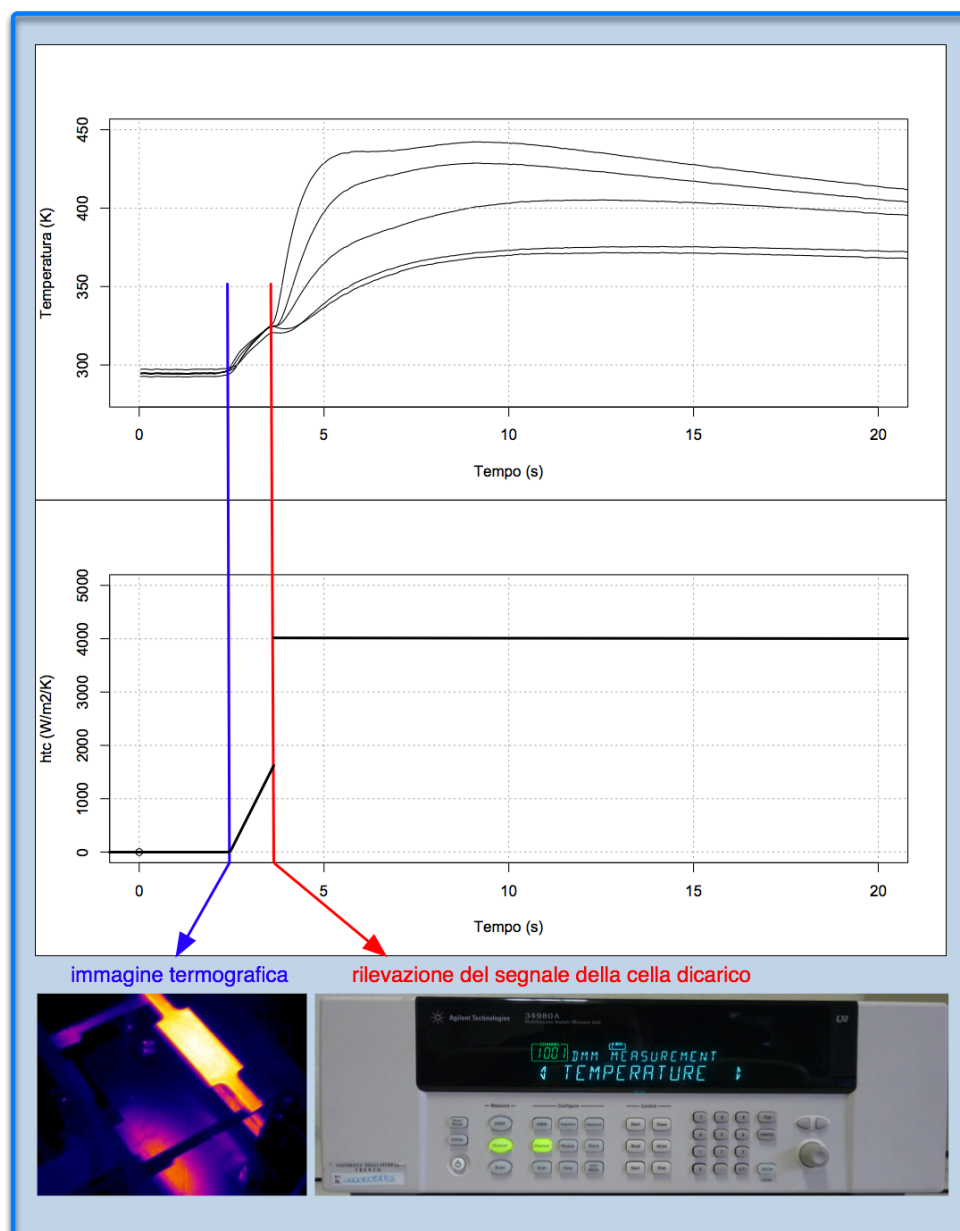


Fig. 3.13. Rilevazione dei tempi di simulazione.

lavorazione del fondo della cava di alloggiamento della termocoppia laterale sinistra (all'apertura degli stampi, il fondo cava risulta ad una quota di 1.2 mm rispetto al piano di stampaggio, contro la quota nominale di 1 mm) ed in parte all'imprecisione di collocazione

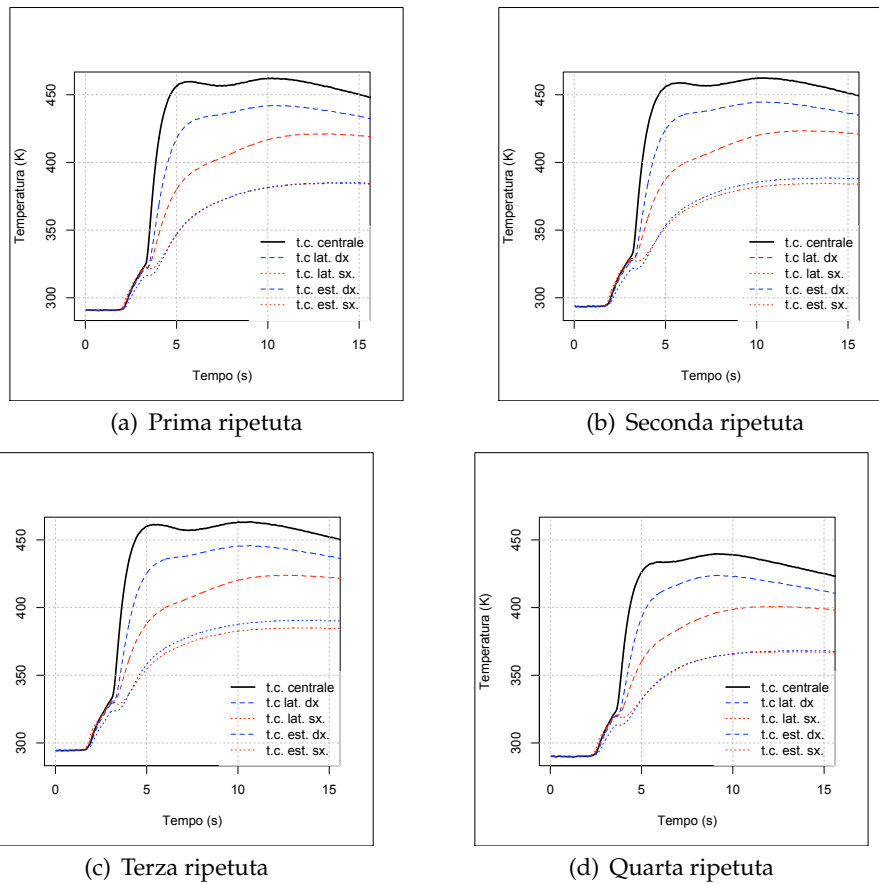


Fig. 3.14. Dati acquisiti nella 4 ripetizioni delle prove con stampo in zirconia p.s. alla pressione di contatto di 30 MPa.

della giunzione calda, che può non essere perfettamente in contatto col fondo cava. Per questi motivi, la termocoppia laterale scelta per la validazione è sempre quella indica la temperatura massima più elevata nell'arco della prova.

L'errore casuale è invece dovuto alla conduzione del test: la sua entità è minimizzata grazie all'adozione degli accorgimenti presentati nella Sezione 3.1, ed infatti si può apprezzare in Figura 3.14 come lo scostamento tra curve di temperatura omologhe (ossia rilevate in punti nominalmente isotermini) sia sostanzialmente lo stesso per ciascuna ripetuta.

3.4.2 Le misure di microdurezza

Le prove di microdurezza permettono la comprensione dei fenomeni microstrutturali che avvengono in fase di raffreddamento secondo quanto riportato in Figura 3.16(b). Le prove consistono nella misura tramite microindentazione a 0.5 N (prova HV 0.05) della durezza del campione in 7 punti sulla sezione in corrispondenza (nominale) al piano di misura.

Le prove effettuate a campione evidenziano una sostanziale uniformità rispetto alla pressione applicata agli stampi e rispetto alla posizione di rilievo, essendo la deviazione standard abbastanza contenuta e confrontabile con quella del materiale di partenza. In base ai valori di microdurezza riportati in tabella 3.4.2, è possibile affermare che a fine test, per ogni materiale dello stampo considerato, la microstruttura del campione è completamente martensitica.

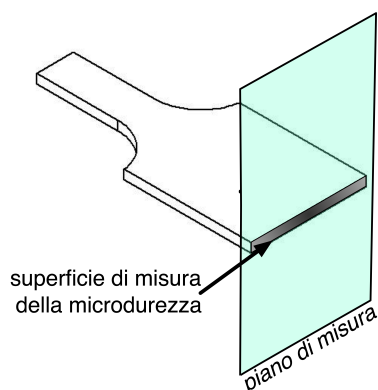
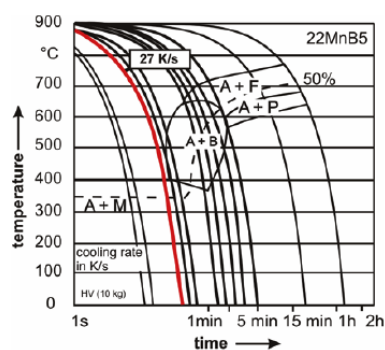


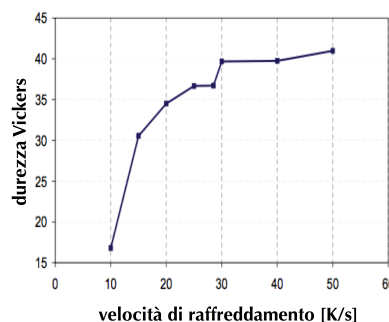
Fig. 3.15. Sezione di misura della microdurezza.

3.4.3 Riassunto dei dati rilevati

I dati rilevati che si presentano sono riferiti a 3 termocoppie anziché 5: ciò è dovuto alla scelta di utilizzare i soli dati rilevati dalla termocoppia tra le due omologhe che indica la temperatura maggiore (come illustrato nella Sezione 3.4).



(a) Curve CCT per lo Usibor 1500P[®], fornite da ArcelorMittal [50].



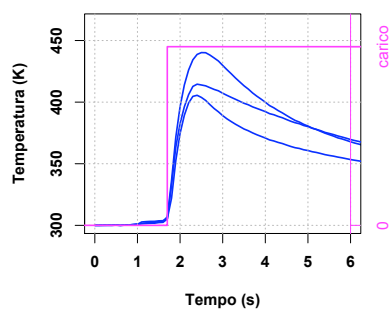
(b) Microdurezza misurata a temperatura ambiente dopo raffreddamento a diverse velocità.

Fig. 3.16. Informazioni per l'interpretazione dei risultati delle misure di microdurezza eseguite sul campione stampato [58].

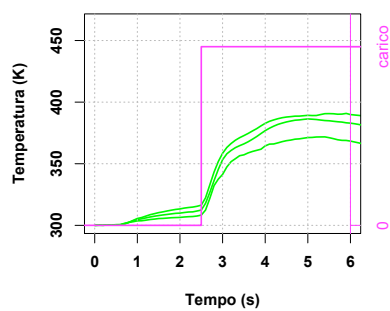
Materiale stampo	acciaio allumina macor zirconia p.s.			
	materiale t.q.			
Durezza HV 0.05	182	565	560	518
Deviazione standard HV 0.05	7.8	12.4	21.8	12.4

Table 3.11. Valori di microdurezza misurati dopo stampaggio.

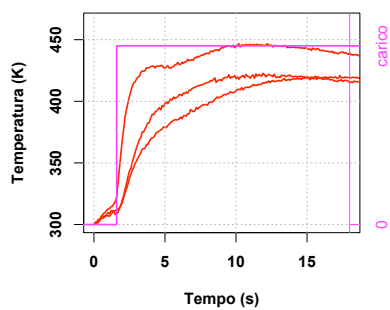
Dalle curve di temperatura e carico riportate in Figura 3.17 vengono estratti tutti i dati di input per la successiva identificazione attraverso l'analisi inversa agli elementi finiti (Sezione 4) e attraverso l'analogia elettrica (Sezione 5).



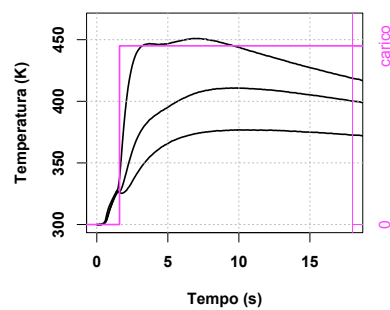
(a) Stampo in acciaio



(b) Stampo in allumina



(c) Stampo in macor



(d) Stampo in zirconia p.s.

Fig. 3.17. Temperatura rilevata nello stampo per prove eseguite alla pressione di 20 MPa e temperatura iniziale del campione compresa tra 740-760 °C.

Identificazione tramite analisi inversa agli elementi finiti

L'analisi inversa agli elementi finiti condotta si basa sull'ottimizzazione del HTC rispetto al campo termico rilevato all'interno degli stampi alla termocoppia centrale (A, figura 3.11). L'ottimizzazione è eseguita su un modello semplificato che replica il test reale: per aumentare la rapidità di calcolo del HTC , per l'identificazione è stato utilizzato un modello bidimensionale. La riduzione del modello è giustificata dal confronto tra le simulazioni ed è resa possibile dagli accorgimenti adottati nella progettazione del test.

La simulazione è stata condotta con il software COMSOL MULTIPHYSICS versione 3.4, sfruttando per la gestione della procedura di ottimizzazione il pacchetto Script.

La simulazione del test è puramente termica: la configurazione di prova permette di ritenere gli aspetti meccanici influenti ai fini del calcolo del HTC . La dipendenza del HTC dalla pressione non interviene nel singolo test ma viene individuata dalla raccolta dei risultati di ciascun test collezionati secondo il valore della pressione di contatto imposta. Gli aspetti microstrutturali sono considerati come indipendenti dalla cinetica di raffreddamento del campione: questa assunzione piuttosto forte non condiziona di fatto la validità dell'identificazione.

4.1 Il modello numerico

Nei paragrafi che seguono si troverà la descrizione dei modelli agli elementi finiti approntati: il primo, il modello esteso, descrive dettagliatamente il sistema ed è stato largamente utilizzato in fase di progettazione; il secondo, che presenta già delle semplificazioni, è un modello

di complessità intermedia che serve a validare numericamente il modello bidimensionale utilizzato.

Oltre alle semplificazioni geometriche di cui sopra, sono state fatte delle assunzioni riguardo il comportamento dei corpi durante il test che non compromettono il risultato dell'identificazione. Il rapporto tra le capacità termiche dei corpi considerati, la scelta del piano di misura, l'alloggiamento delle termocoppie, la tecnica di conduzione e gli accorgimenti tecnici di approccio del pezzo in stampo presentati nella Sezione 3 trovano giustificazione progettuale nei vantaggi numerici che comportano e che appariranno chiari nelle sezioni che seguono.

La simulazione effettuata si divide in due parti: la prima ha come obiettivo la stima della temperatura del campione nell'istante di chiusura degli stampi; la seconda è l'oggetto dell'analisi inversa ed ha come obiettivo l'ottimizzazione del HTC rispetto all'evoluzione della temperatura alla termocoppia centrale.

4.1.1 Gli aspetti meccanici e microstrutturali

La progettazione del test permette di trascurare nella simulazione gli aspetti meccanici e microstrutturali. Per i primi, lo stampaggio piano del campione rende omogenea la pressione sull'intera superficie di contatto, ed essendo la pressione applicata costante durante il test non è necessario inserire nella simulazione nessuna legge di variazione delle condizioni di scambio termico rispetto alla pressione. Le pressioni di contatto sono tali da mantenere le sollecitazioni sui corpi entro il loro limite elastico.

Le misure di microdurezza eseguite sul campione in corrispondenza della sezione di misura (Sezione 3.4.2) evidenziano che il materiale stampato è completamente martensitico: l'evoluzione microstrutturale del campione può quindi essere considerata, con buona approssimazione, costante per tutti i test eseguiti, e l'effetto dell'evoluzione microstrutturale appunto su quella termica è computata direttamente come una quantità di calore (85 J/kg) [5, 59] generata dal campione quando questo, in fase di raffreddamento, attraversa la zona della trasformazione martensitica (inizio trasformazione, $M_s = 420^\circ\text{C}$; fine trasformazione).

Non considerare l'effetto termico degli aspetti microstrutturali come dipendente dalla cinetica di raffreddamento del campione può causare delle imprecisioni nella simulazione della temperatura interna agli

stampi, ma non incide in modo significativo sul valore di HTC identificato.

Le scelte di identificare per ciascuna prova un unico valore di HTC , indipendente dalla differenza istantanea di temperatura tra i corpi a contatto e dalla cinetica di raffreddamento del campione, rende l'identificazione molto robusta e conferisce ai risultati una validità ampia.

4.1.2 La simulazione dell'approccio

La prima parte della simulazione ha inizio nell'istante di rilevazione della temperatura del campione (acquisita tramite termocamera, figura 3.13) e si conclude nell'istante di chiusura degli stampi, rilevato dal segnale della cella di carico (figura 3.13). L'obiettivo della simulazione è stimare il campo termico di campione e stampi nell'istante di chiusura degli stessi. I dati di input sono la temperatura degli stampi, la temperatura del campione nell'istante di ingresso tra gli stampi e la durata (individuata dalla distanza tra linea blu e linea rossa, figura 3.13).

La procedura di test minimizza la durata di questa parte di simulazione, affinché essa non condizioni in modo significativo l'efficienza e la qualità dell'identificazione successiva.

Le assunzioni fatte per questa parte della simulazione sono:

- il campione scambia calore solo con gli stampi;
- il coefficiente di scambio termico globale tra campione e stampi cresce linearmente nel tempo (seguendo l'andamento del fattore di vista).

La validità di queste assunzioni è strettamente legata alla conduzione del test, all'approccio del campione tra gli stampi e degli stampi sul campione. La durata ridotta del fenomeno considerato (minore di 1.5 s) rende l'influenza della temperatura di stampi e campione nell'istante di chiusura sull'identificazione del HTC inferiore al 10%.

Il coefficiente di scambio termico superficiale globale tra stampo e campione assume valore nullo nell'istante iniziale (linea blu, figura 3.13) per crescere linearmente nel tempo fino alla chiusura degli stampi (linea rossa, figura 3.13) con costante di proporzionalità che viene ottimizzata per ciascuna prova sulla base della variazione di temperatura rilevata nello stampo nel tempo considerato. L'andamento lineare è stato scelto in quanto per distanze inferiori al millimetro e per temperature inferiori ai 700 °C la convezione domina rispetto all'irraggiamento

[5]. Pertanto l'andamento del coefficiente di scambio termico convettivo si può considerare seguire quello del fattore di vista tra i corpi. I dati di output della simulazione dell'approccio sono:

- campo termico del campione;
- campo termico degli stampi;

Gli output sono utilizzati come dati di input nell'esecuzione della simulazione per l'identificazione.

4.1.3 La simulazione per l'identificazione

La simulazione per l'identificazione ha inizio nell'istante di chiusura degli stampi e prosegue fino al completo raffreddamento del campione (raggiungimento della temperatura di circa 200 °C) per un tempo variabile a seconda del materiale dello stampo. Il campione è in contatto completo con gli stampi, scambia calore con questi attraverso le due superfici piane e scambia calore con l'aria per convezione e irraggiamento attraverso il suo bordo laterale.

Il HTC è costante (figura 3.13), in quanto la sua dipendenza dalla differenza di temperatura tra stampi e campione non viene considerata, in quanto la dipendenza del HTC dalla temperatura è più debole rispetto a quella dalla pressione [5]: ciò rende qualitativamente peggiore la corrispondenza tra curva di temperatura simulata e rilevata, ma fornisce dei risultati più generali, non influenzati da eventuali assunzioni riguardo la legge di variazione del HTC rispetto alla temperatura considerata (solitamente lineare).

Il HTC è stato introdotto come parametro della simulazione inserendo tra stampo e campione un piano fittizio di spessore e inerzia termica nulli, cui è associata una resistenza termica specifica: il piano si comporta di fatto come una resistenza termica superficiale, che rappresenta l'inverso del HTC . L'elemento "piano" utilizzato è chiamato Thin Thermally Resistive Layer [60].

4.1.4 Il confronto tra i modelli utilizzati

Il primo modello, che descrive in dettaglio la geometria di stampi e campione, è stato utilizzato soprattutto in fase di progettazione della prova per valutare gli effetti degli accorgimenti tecnici adottati sulla distribuzione del campo termico negli stampi e sulle rilevazioni delle termocoppie.

La presenza delle cave e delle termocoppie è stata considerata inserendo nei fori un materiale ceramico con resistenza superficiale lungo la superficie cilindrica nulla. Il materiale, che ha le proprietà fisiche della guaina delle termocoppie, riempie i fori fino a 3 mm dal fondo cava. I filamenti della termocoppia non sono stati considerati, ritenendo trascurabile la loro capacità termica.

L'elevato tempo di calcolo del modello 3D ha suggerito una sua semplificazione: per prima cosa si è effettuata un'analisi di sensibilità della risposta del modello alla presenza delle cave. L'analisi è stata condotta sui 4 materiali utilizzati per gli stampi, utilizzando come *HTC* i valori identificati (con una procedura grezza e non automatizzata) sul modello 3D.

Il modello 3D semplificato considera l'esatta geometria del campione, mentre riduce quella degli stampi non considerando la presenza delle cave e delle termocoppie. Questa semplificazione, seppur forte, non comporta gravi imprecisioni nel modello, mantenendo a parità di condizioni lo scostamento della temperatura simulata al punto di rilevazione A entro il 4 % (figura 4.3).

La differenza tra i risultati dei due modelli (Figura 4.4) è dovuta alla riduzione dell'infittimento della mesh dovuto alla rimozione di fori e termocoppie: a fronte di una riduzione non significativa dei tempi di calcolo, si ottengono risultati di qualità inferiore. Infittire la mesh nel modello 3D semplificato comporta l'aumento dei tempi di calcolo ed il raggiungimento di risultati analoghi a quelli del modello completo. Ciò ha suggerito la creazione di un modello 2D a geometria definita dalla sezione sul piano di simmetria trasversale del modello 3D semplificato. Nel modello 2D la mesh è molto fitta, pur con un numero di elementi decisamente basso rispetto ai due modelli 3D ed i risultati sono assolutamente confrontabili con quelli del modello 3D più dettagliato (Figura: 4.4).

4.1.5 Confronto tra l'efficienza numerica dei modelli.

I modelli considerati hanno tempi di risoluzione molto diversi, dipendenti dal numero di elementi della mesh e dai gradi di libertà ad essi associati. Il confronto proposto è basato sui tempi di simulazione misurati su una piattaforma di calcolo Intel Core Duo Processor T2500, 1.98 GB di memoria *RAM* e frequenza di clock di 2 GHz.

Dai dati riportati in tabella emerge che il tempo di calcolo per la risoluzione del modello 2D sono estremamente ridotti, tanto da rendere

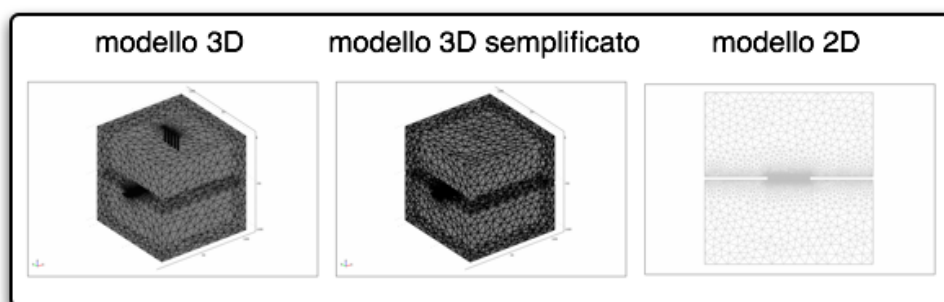


Fig. 4.1. Confronto tra le mesh dei modelli.

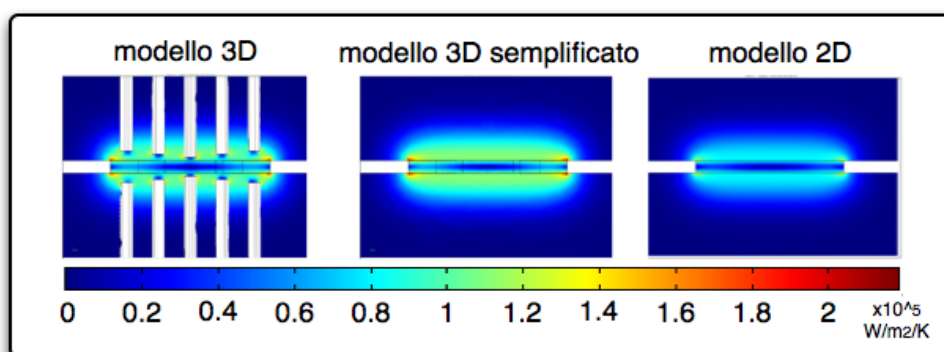


Fig. 4.2. Confronto tra i modelli per il flusso totale sulla sezione di misura nell'istante di raggiungimento della temperatura massima alla termocoppia centrale.

Table 4.1. Analisi dell'efficienza dei modelli numerici

	modello 3D	modello 3D semplificato	modello 2D
n° di gradi di libertà	312087	249331	30233
n° di elementi	199581	156508	14480
n° di punti della mesh	44794	36437	7878
tempo di simulazione [s]	2315	1798	34

la simulazione utilizzabile all'interno di un ciclo di ottimizzazione. La simulazione 3D semplificata non presenta invece sostanziali vantaggi rispetto alla 3D estesa. La procedura di identificazione presentata nella Sezione che segue richiede un numero minimo di 8 simulazioni per ciascun test: appare chiaro che l'adozione del modello 2D è necessaria

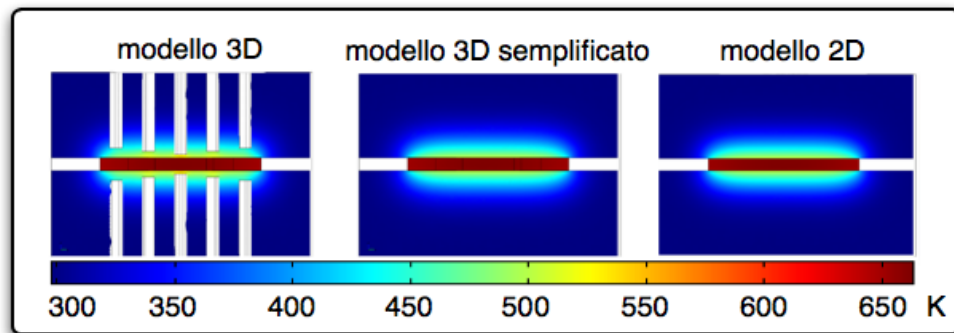


Fig. 4.3. Confronto tra i modelli per il campo termico sulla sezione di misura nell'istante di raggiungimento della temperatura massima alla termocoppia centrale.

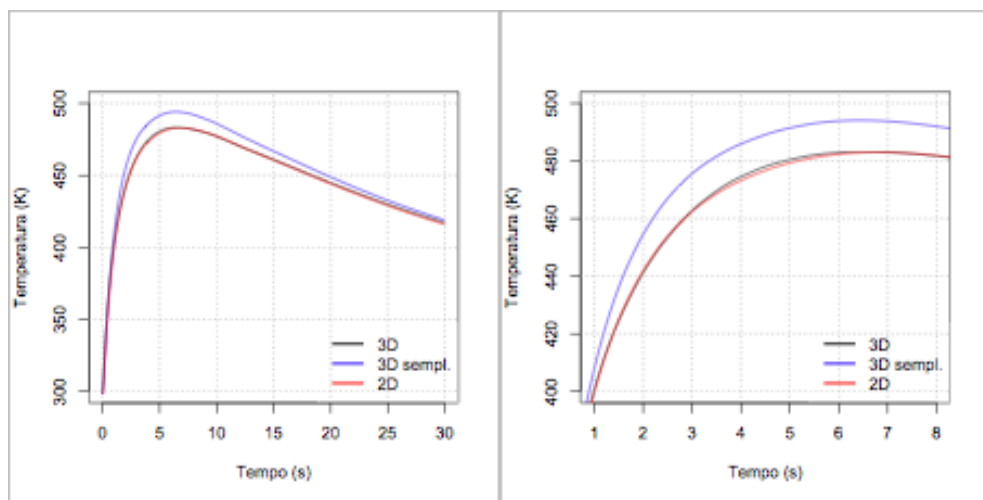


Fig. 4.4. Confronto tra i modelli per l'evoluzione della temperatura al punto di rilievo A (Figura 3.11).

per rendere accettabili i tempi di calcolo senza pregiudicare la qualità dei risultati.

4.2 L'analisi inversa

L'analisi inversa agli elementi finiti è condotta ricercando il valore di *HTC* che rende minimo lo scostamento tra la curva di temperatura simulata e rilevata alla termocoppia centrale. Il problema di minimizzazione richiede la definizione di una funzione obiettivo, la definizione

di un dominio di ricerca del HTC e l'adozione di una tecnica robusta per la ricerca del minimo assoluto, evitando minimi relativi che si potrebbero presentare.

Il dominio di ricerca è individuato sulla base di considerazioni fisiche pertinenti lo scambio di calore: la sua entità condiziona significativamente i tempi di ottimizzazione.

La funzione obiettivo ha una formulazione semplice: è pari allo scarto quadratico medio tra la curva di temperatura rilevata dalla termocoppia centrale e quella simulata.

L'analisi inversa è stata preceduta da un'analisi di robustezza, condotta in fase di progettazione dei test, che qualifica le misure effettuate come idonee ad essere utilizzate per l'analisi inversa.

4.2.1 L'analisi di robustezza

La robustezza dell'analisi inversa è stata verificata attraverso il calcolo del numero di Fourier F_0 [34,61] secondo la formula:

$$F_0 = \frac{d\Delta t}{e^2} \quad (4.1)$$

dove e è la distanza tra punto di misura e superficie di contatto, Δt è l'inverso della frequenza di acquisizione dei dati e d è la diffusività termica del materiale dello stampo.

$$d = \frac{k}{\rho C} \quad (4.2)$$

Secondo l'analisi di Fourier, l'analisi inversa è robusta ed affidabile se il numero di Fourier F_0 è compreso tra 1 e 0.01: come si può vedere in tabella 4.2 la termocoppia centrale fornisce, per ciascun materiale considerato, dati utilizzabili per l'analisi inversa, mentre le misure delle termocoppie laterali hanno grado di affidabilità minore e non adatto all'analisi inversa.

4.2.2 Il dominio di ricerca

Il dominio di ricerca del HTC ha come estremo minimo i $50 \text{ W/m}^2/\text{K}$, che è il coefficiente di convezione naturale in aria tra due pareti piane e parallele adiacenti non a contatto. Il limite superiore è individuato

Table 4.2. Analisi di Fourier

	acciaio	allumina	macor	zirconia p.s.
K [$\frac{W}{(mK)}$]	22	20	1.46	2.5
C [$\frac{J}{(kgK)}$]	450	510	790	400
ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	7750	3850	2520	6040
α [$\frac{m^2}{s}$]	$6.31E^{-6}$	$1.02E^{-5}$	$7.33E^{-7}$	10.4×10^{-6}
dt [s]	0.01	0.01	0.01	0.01
F_0-A	0.3096	0.3872	0.0293	0.0412
F_0-B	$7.74E^{-2}$	$9.68E^{-2}$	$7.33E^{-3}$	$1.03E^{-2}$
F_0-C	$3.44E^{-2}$	$4.30E^{-2}$	$3.26E^{-3}$	$4.57E^{-3}$

confrontando la resistenza termica offerta dal HTC con quella dovuta al materiale dello stampo che separa la superficie di contatto col campione dal punto di rilievo della temperatura: raggiunto un certo valore di HTC , la resistenza termica ad esso dovuta è talmente bassa se confrontata con quella offerta dal materiale che il suo effetto sulla curva di temperatura alla termocoppia centrale è trascurabile. Le resistenze termiche relative al HTC ed al materiale di separazione della termocoppia di rilevazione dal piano di contatto sono poste in serie e possono essere sommate nel termine resistenza termica totale (R_{tt}).

$$R_K = \frac{1}{K}l \quad (4.3)$$

$$R_{HTC} = \frac{1}{HTC} \quad (4.4)$$

$$R_{tt} = R_K + R_{HTC} \quad (4.5)$$

$$(4.6)$$

Per acciaio e allumina, fissando il limite di sensibilità al HTC al 10 %, si ha:

$$K = 20 \frac{W}{m \cdot K} \quad (4.7)$$

$$l = 5E - 4 \text{ m} \quad (4.8)$$

$$R_K = 25E - 6 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (4.9)$$

$$R_{HTC} = R_K 10/100 = 2.5E - 6 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (4.10)$$

$$HTC_{max} = \frac{1}{R_{HTC}} = 4E5 \quad (4.11)$$

mentre per macor e zirconia p.s., si ha:

$$K = 2 \frac{W}{m \cdot K} \quad (4.12)$$

$$l = 5E - 4 \text{ m} \quad (4.13)$$

$$R_K = 25E - 5 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (4.14)$$

$$R_{HTC} = R_K 10/100 = 2.5E - 5 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (4.15)$$

$$HTC_{max} = \frac{1}{R_{HTC}} = 4E4 \quad (4.16)$$

Per stampi in acciaio e allumina il dominio di ricerca del HTC va dai $50 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ai $800000 \text{ W/m}^2/\text{K}$; per stampi in macor e zirconia p.s. il campo di esistenza del HTC va invece dai $50 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ai $80000 \text{ W/m}^2/\text{K}$. L'estremo superiore del dominio di ricerca del HTC è individuato attraverso una considerazione che riguarda la resistenza termica totale: la Figura 4.5 mostra come per valori piuttosto bassi (se confrontati con l'ampiezza del dominio di ricerca) di HTC la resistenza termica totale in corrispondenza del punto di rilievo della temperatura A (Figura 3.11) è altamente influenzata da esso, mentre per valori maggiori l'incidenza della resistenza termica relativa al HTC sulla resistenza termica totale è molto limitata. Ciò suggerisce di esplorare il dominio di ricerca del minimo concentrando le osservazioni a valori bassi di HTC , in quanto per valori alti la sensibilità della resistenza termica totale e quindi della curva di temperatura rilevata nel punto A alle variazioni del HTC è molto limitata.

Nella Sezione 4.2.4 si potrà apprezzare come l'efficienza dell'algoritmo di ottimizzazione sia nettamente migliore nel dominio della resistenza termica totale piuttosto che in quello del HTC .

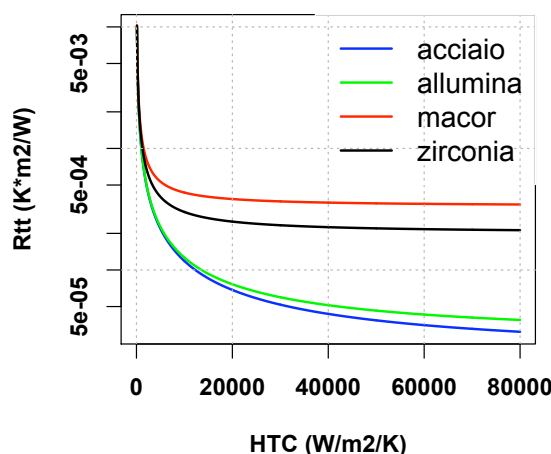


Fig. 4.5. Andamento della resistenza termica totale al punto di misura A rispetto al HTC .

4.2.3 La funzione obiettivo

La funzione obiettivo può essere più o meno complessa, si possono introdurre dei pesi attraverso i quali enfatizzare l'importanza di alcuni termini rispetto ad altri, oppure si può optare per una formulazione semplice che renda la tecnica di ottimizzazione maggiormente flessibile e permetta un'identificazione robusta rispetto alla procedura di test seguita.

La funzione obiettivo è definita come lo scarto quadratico medio normalizzato rispetto alla temperatura massima raggiunta dalla termocoppia centrale, tra la curva di temperatura simulata e rilevata in posizione A (Figura 3.11), ed è calcolata su un tempo pari ad 1.5 volte il tempo di raggiungimento (t_{max}) della temperatura massima (T_{max}). Nel caso di stampi in acciaio e allumina questo tempo è di circa 4 s, mentre per macor e zirconia p.s. è di 15 s: in questo intervallo di tempo si verifica un progressivo aumento della sensibilità del modello alle condizioni imposte sui bordi dello stampo (convezione), che rende l'analisi inversa poco robusta per tempi superiori.

Lo scarto quadratico medio tra le due curve è calcolato come il quadrato della differenza tra temperatura rilevata e simulata nel medesimo istante di tempo, normalizzato sull'intervallo temporale considerato. In

formule, derivate dalla 2.16:

$$Q = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T_i^{RIL} - T_i^S)^2}}{NT_{max}} \quad (4.17)$$

Dove N è il numero di intervalli temporali considerati e T_{max} (espressa in K) è la temperatura massima rilevata alla termocoppia centrale.

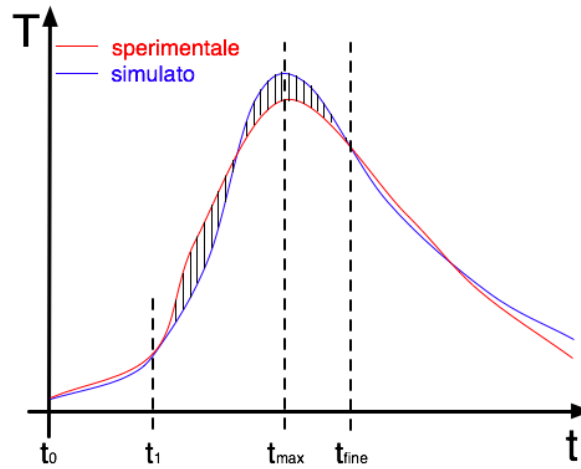


Fig. 4.6. Calcolo delle differenze tra la temperatura rilevata e simulata.

La differenza tra temperatura rilevata e simulata viene fatta secondo segmenti verticali (figura 4.6) anziché secondo i segmenti di minima distanza per enfatizzare gli effetti del transitorio iniziale di salita di temperatura dello stampo.

La funzione Q così definita è continua sia nel dominio del HTC che in quello della resistenza termica totale.

4.2.4 L'ottimizzazione

All'interno del dominio di ricerca definito nella sezione 4.2.2 il valore di HTC ottimo è individuato secondo un algoritmo di ottimizzazione basato sulla ricerca del minimo valore della funzione Q definita nella 4.17. Una serie di simulazioni condotte preliminarmente allo sviluppo dell'algoritmo evidenzia che la funzione Q presenta un minimo unico

in corrispondenza di valori di HTC molto bassi rispetto all'estensione del dominio di ricerca (Figura 4.7).

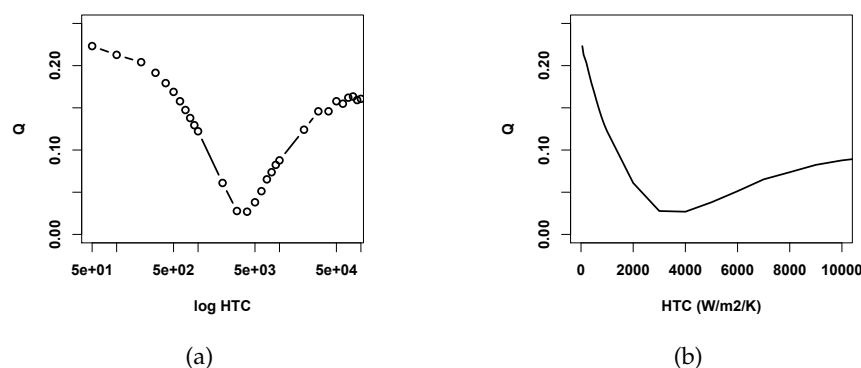


Fig. 4.7. Andamento tipico della funzione Q nel dominio del HTC .

Per valori elevati di HTC , la resistenza termica totale varia in modo sostanzialmente trascurabile (Figura 4.5): di conseguenza, la forma della curva di temperatura in posizione A (Figura 3.11) è determinata sostanzialmente dalla sola resistenza termica offerta dal materiale (Figura 4.8).

Queste considerazioni escludono la presenza di eventuali minimi della funzione Q per valori di HTC maggiori a quello che individua il primo minimo. Pertanto l'algoritmo di ottimizzazione esplora il dominio di ricerca partendo da valori bassi di HTC sfruttando il metodo della *regula falsi*, presentato nella Sezione 2.3.3. Il metodo è utilizzato con interpolazione di primo grado per valori di HTC inferiori al punto di minimo (alla destra del minimo della funzione Q , Figura 4.7), e con interpolazione del secondo ordine quando si dispone di un valore della funzione Q associato ad un HTC maggiore del minimo (alla sinistra del minimo della funzione Q , Figura 4.7).

Il primo valore di HTC tentativo (HTC_a , ascissa del punto a , Figura 4.9(a)) corrisponde all'estremo inferiore del dominio di ricerca ($50 \text{ W/m}^2/\text{K}$); il secondo (HTC_b), scelto a piacere in un intorno sufficientemente piccolo del primo, è pari a $70 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Il terzo valore di HTC (HTC_c , Figura 4.9(a)) è individuato, secondo appunto il metodo della *regula falsi*, dall'intersezione della retta passante per i primi due punti considerati con l'asse delle ascisse. Si procede in questo modo

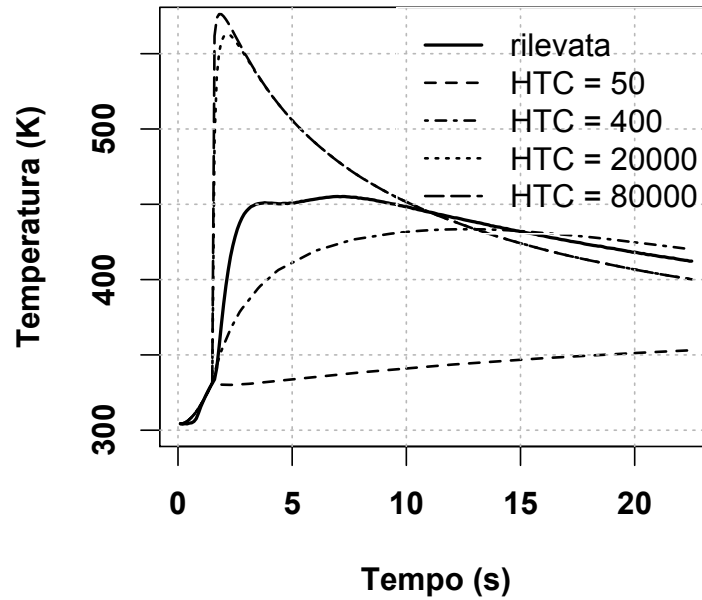


Fig. 4.8. Confronto tra curva di temperatura rilevata e curve simulate a diversi valori di HTC .

fino ad individuare un HTC i -esimo per cui il valore della funzione Q è maggiore rispetto a quello associato al HTC $(i-1)$ -esimo (Figura 4.9(d), punto f , quarta iterazione).

A questo punto l'algoritmo di ricerca prevede una modifica della tecnica di ricerca del minimo, per permettere una più veloce convergenza verso il valore di HTC ottimo. Si confrontano tra loro le ultime quattro iterazioni eseguite, scegliendo il punto con Q minore (punto e , Figure 4.9(d) e 4.10(a)). Questo punto e i due adiacenti, uno a destra (HTC minore, punto d) ed uno a sinistra (HTC maggiore, punto f), vengono interpolati con un polinomio di secondo grado, l'ascissa del cui vertice (HTC_g , Figura 4.10(a)) è scelta come valore di HTC per l'iterazione successiva. La procedura si arresta quando la differenza tra il HTC individuato alla iterazione $(k+1)$ -esima e quello individuato all'iterazione k -esima è inferiore a $10 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

In termini analitici, si può scrivere per le prime iterazioni:

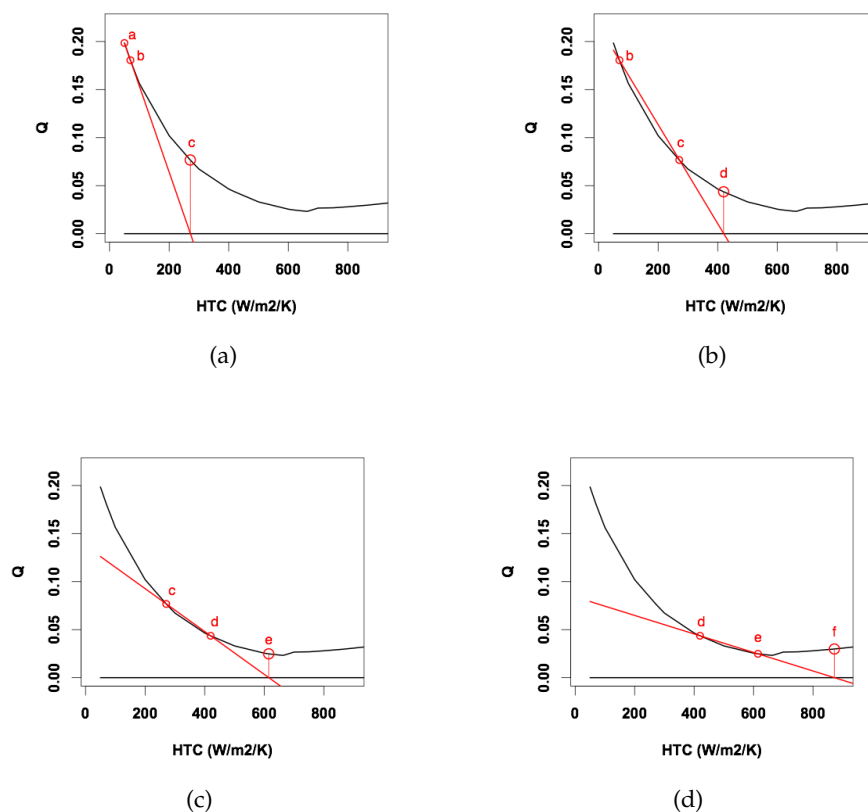


Fig. 4.9. Prime iterazione dell'algoritmo di Newton modificato per la localizzazione del minimo della funzione Q .

$$\begin{cases} Q(x_{k-1}) = mx_{k-1} + q \\ Q(x_k) = mx_k + q \\ x_{k+1} = \frac{-q}{m} \end{cases}$$

Da cui:

$$x_{k+1} = \frac{Q(x_k)x_{k-1} - Q(x_{k-1})x_k}{Q(x_k) - Q(x_{k-1})} \quad (4.18)$$

La condizione di passaggio dall'intersezione lineare per due punti all'intersezione parabolica per tre punti è espressa:

$$Q(x_{k+1}) > Q(x_k) \quad (4.19)$$

Soddisfatta questa condizione, le iterazioni assumono la forma:

$$\begin{cases} Q(x_{k-2}) = ax_{k-2}^2 + bx_{k-2} + c \\ Q(x_{k-1}) = ax_{k-1}^2 + bx_{k-1} + c \\ Q(x_k) = ax_k^2 + bx_k + c \\ x_{k+1} = \frac{-b}{2a} \end{cases}$$

Da cui:

$$x_{k+1} = \frac{\alpha_{k+1}}{\beta_{k+1}} \quad (4.20)$$

$$\alpha_{k+1} = -Q(x_{k-2})x_{k-1}^2 + Q(x_k)x_{k-1}^2 + Q(x_{k-1})x_{k-2}^2 + Q(x_{k-2})x_k^2 - Q(x_{k-1})x_k^2 - Q(x_k)x_{k-2}^2 \quad (4.21)$$

$$\beta_{k+1} = -2(Q(x_{k-2})x_{k-1} + Q(x_{k-2})x_k + Q(x_{k-1})x_{k-2}) + -2(Q(x_k)x_{k-2} + Q(x_k)x_{k-1} - Q(x_{k-1})x_k) \quad (4.22)$$

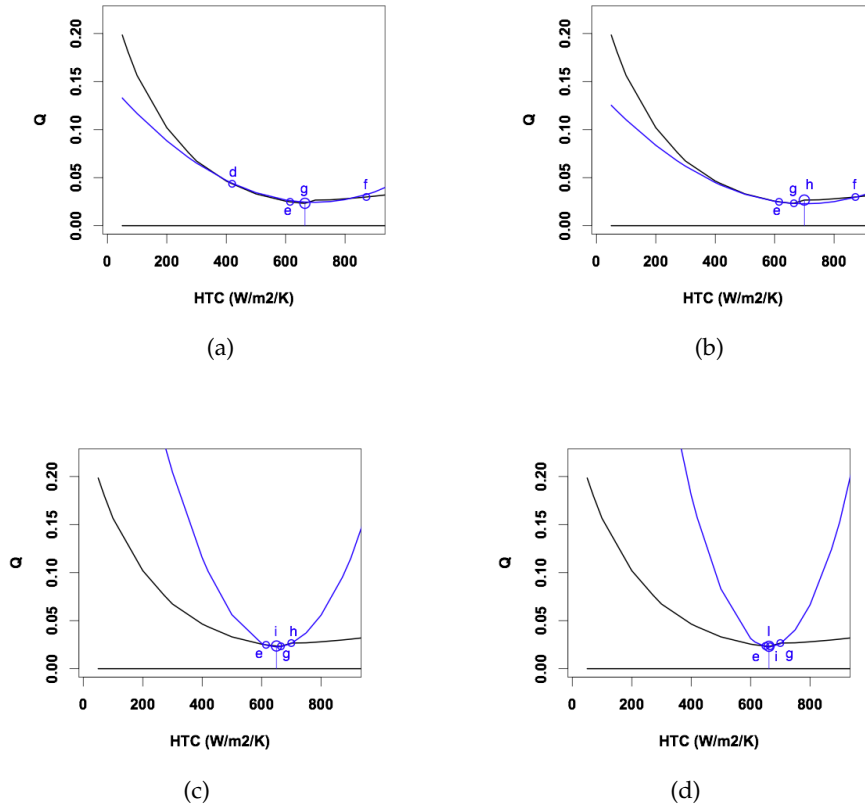


Fig. 4.10. Interazioni finali dell'algoritmo di Newton modificato per la localizzazione del minimo della funzione Q .

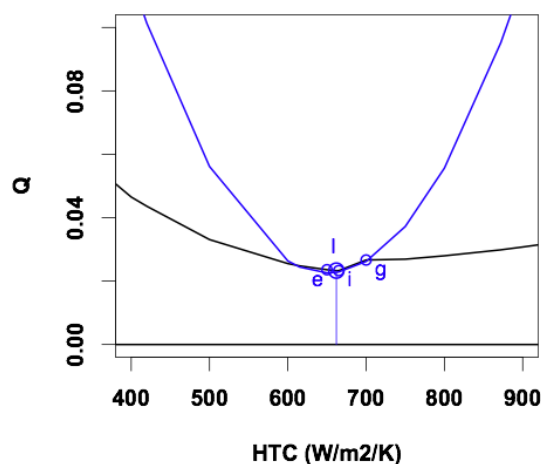


Fig. 4.11. Dettaglio grafico dell'ultima iterazione con arresto della procedura di ricerca.

Attraverso questa procedura è sufficiente l'esecuzione di meno di 10 simulazioni (con tempo di calcolo caratteristico di circa 30 s ciascuna) per identificare il valore di HTC ottimo per un singolo test.

4.3 Risultati

Dei dati rilevati per ciascun test (Figura 3.17) solamente l'andamento della temperatura in posizione A è utilizzato per l'identificazione. I dati relativi alle termocoppie B e C sono utilizzati per la stima della qualità dell'identificazione: il valore minimo della funzione Q calcolata per la posizione di rilevamento A è un indicatore della qualità del test eseguito (corretto approccio del campione tra gli stampi, posizionamento rapido e preciso, ecc.), mentre la funzione Q calcolata per la posizione di rilevamento B fornisce un'importante conferma (o smentita) della qualità del modello agli elementi finiti approntato. Si ritiene attendibile il HTC identificato quando il valore della funzione Q calcolato per la termocoppia in posizione B è confrontabile (maggiore di non più del 25%) con quello calcolato per la posizione A.

Secondo il piano sperimentale previsto, per ciascun tipo di stampo, a ciascun livello di pressione, si identificano, attraverso 5 test, 5 valori di HTC . Il HTC per cui la funzione Q è maggiore viene scartato. Gli altri

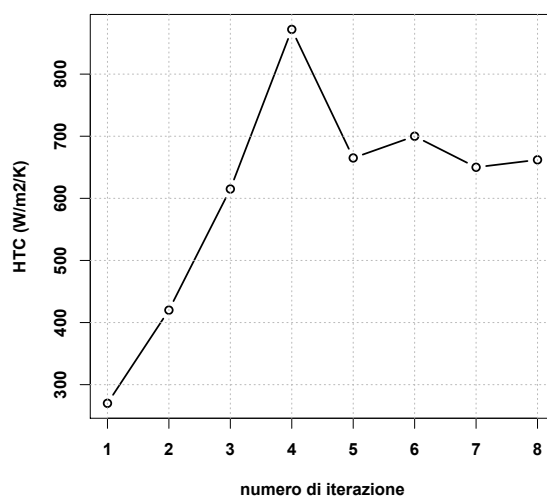


Fig. 4.12. Evoluzione dei valori di HTC individuati rispetto al numero delle iterazioni.

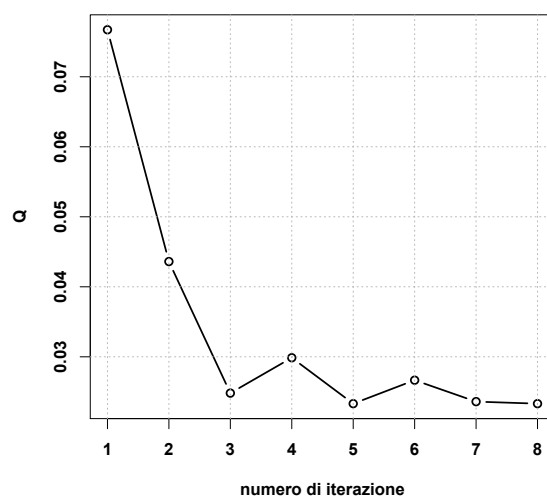
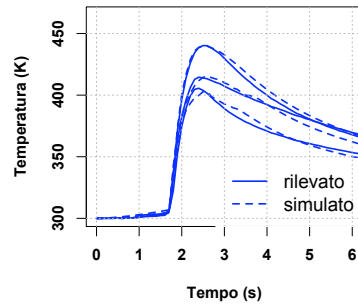
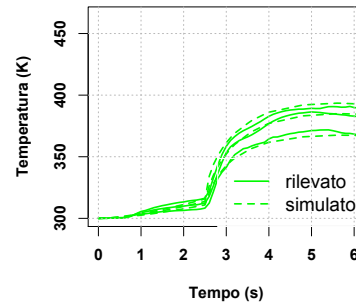


Fig. 4.13. Andamento della funzione Q rispetto al numero delle iterazioni.

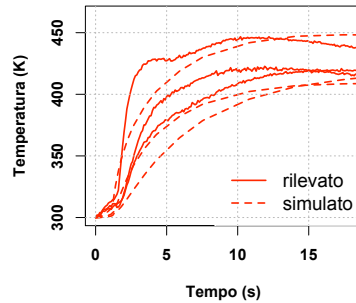
4 HTC vengono mediati e si ottiene così, per ciascun livello di pressione, un unico valore di HTC che è fornito corredato dalla deviazione standard, come riportato in Figura 4.15.



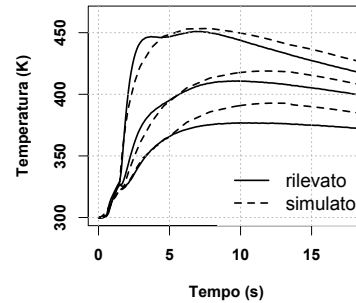
(a) Stampo in acciaio



(b) Stampo in allumina



(c) Stampo in macor



(d) Stampo in zirconia p.s.

Fig. 4.14. Confronto tra evoluzione del campo termico rilevata e simulata all'interno dello stampo per 4 test eseguiti con materiali diversi.

A conclusione dei test sperimentali si sono eseguite delle simulazioni utilizzando come dati di input i valori medi rilevati differenziati per ciascun materiale (come riportato in Tabella 4.3), andando a ricostruire le curve di raffreddamento dei campioni per i 4 casi (riportate in Figura 4.18).

Dal confronto tra le curve di temperatura rilevate e simulate (Figura 4.14) emerge che per stampi in acciaio e allumina la forma della curva di temperatura simulata è molto simile a quella della temperatura rilevata. Per stampi in macor e zirconia p.s. si può notare come la curva di temperatura rilevata non abbia un andamento del tutto regolare: ciò è probabilmente dovuto all'evoluzione della microstruttura del campione, che potrebbe non essere conforme alle assunzioni adottate (pre-

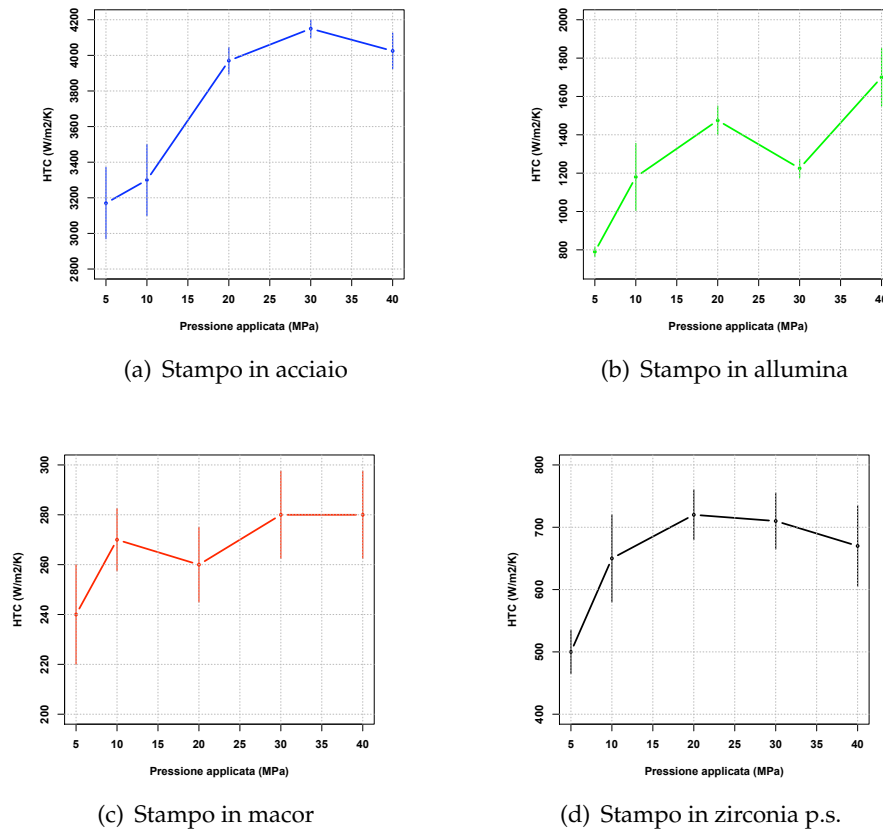


Fig. 4.15. Andamento del HTC in funzione della pressione di contatto con bande di deviazione standard sui test.

sentate nella Sezione 4.1.1.

Se i test di microdurezza confermano la completa trasformazione martensitica in corrispondenza della sezione di misura, potrebbero verificarsi, nelle zone di bordo del campione, delle trasformazioni microstrutturali non computate nel modello FE. Ciò può essere causa di generazione (piuttosto che di sottrazione) di calore all'interno del campione, con conseguente manifestarsi di flussi termici ortogonali al piano di misura. Questi fenomeni, pur peggiorando la qualità dell'identificazione dal punto di vista dell'entità della funzione Q , non incidono sulla validità dei risultati ottenuti, come conferma l'accordo tra la microstruttura prevista sovrapponendo le curve di raffreddamento individuate alle curve CCT (Figure 4.17 e 4.18) e la microstruttura sti-

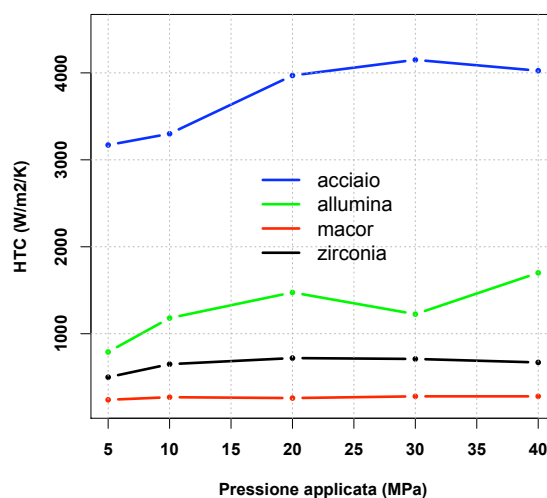


Fig. 4.16. Confronto tra gli *HTC* identificati.

mata attraverso le prove di microdurezza (Sezione 3.4.2).

La curva rossa continua (Figure 4.17 e 4.18) rappresenta il limite superiore della velocità di raffreddamento oltre quale la microstruttura finale del pezzo non è completamente martensitica. Le curve di raffreddamento ricostruite, stando tutte a sinistra rispetto alla rossa continua, confermano che i campioni stampati devono avere struttura martensitica.

		acciaio	allumina	macor	zirconia	p.s.
<i>HTC</i>	$W/m^2/K$	4000	1400	300	700	
T stampi	°C	30	30	30	30	
T campione	°C	1000	1000	1000	1000	

Table 4.3. Dati di input “normalizzati” per le simulazioni.

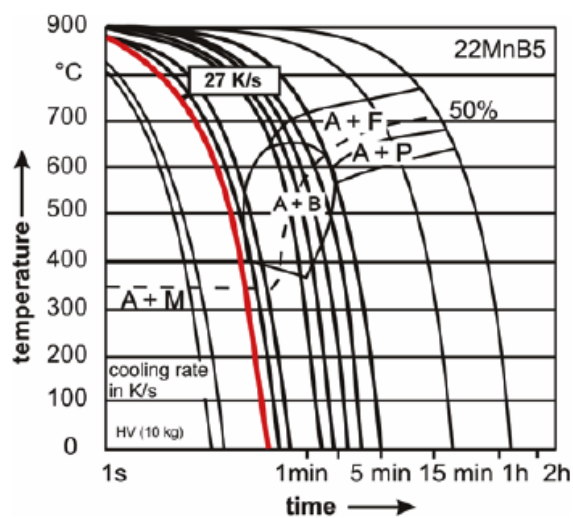


Fig. 4.17. Curve CCT per lo Usibor 1500P[®], fornite da Arcelor.

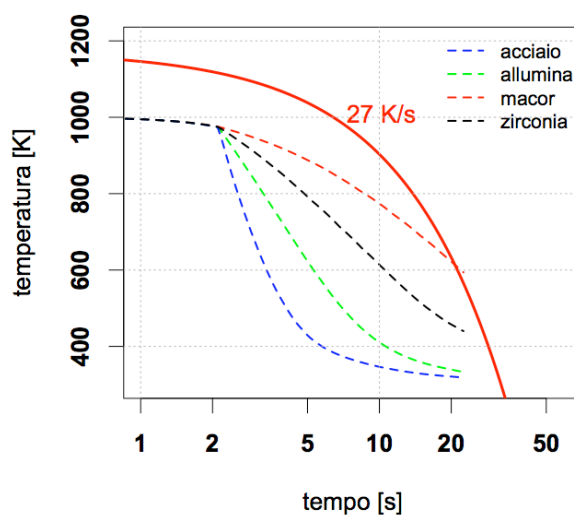


Fig. 4.18. Curve di raffreddamento ricostruite dal modello FE per i 4 materiali dello stampo confrontate con la curva di raffreddamento di 27 K/s.

Identificazione analitica

Di seguito sono proposte due tecniche di identificazione analitica del coefficiente di scambio termico: la prima si basa sulla modellazione analogica del problema con risoluzione del circuito elettrico equivalente, mentre la seconda sfrutta l'equazione dello scambio termico per corpi a resistenza interna nulla. La prima tecnica può essere adottata per i test condotti, in quanto si basa su grandezze rilevate dal sistema in uso, mentre la seconda è riportata per rendere possibile il confronto tra i risultati ottenuti ed altri presenti in letteratura (per il solo caso degli stampi in acciaio).

Ciascuna tecnica risolve in modo esatto equazioni che descrivono, in modo approssimato, il fenomeno dello scambio termico che interviene tra stampi e campione: il risultato di queste identificazioni dipende dall'effettivo realizzarsi delle assunzioni fatte per rendere il problema risolvibile in forma analitica.

La prima tecnica presentata identifica il HTC sulla base della misurazione del tempo trascorso dall'istante di contatto stampo-campione all'istante in cui la temperatura rilevata dalla termocoppia centrale raggiunge il suo massimo. L'analogia elettrica permette uno studio a parametri concentrati del problema termico e la sua attendibilità è vincolata all'assunzione di flusso monodimensionale del calore in corrispondenza del punto di misura.

La seconda tecnica, già descritta nella Sezione 2.3.1, è stata utilizzata da altri autori [17] per identificare il HTC nello stampaggio di lamiera in acciaio al boro rivestito: la tecnica non è applicabile alla tipologia di test descritto in questo lavoro, ma i risultati ottenuti in passato con questa tecnica possono essere confrontati con quelli presentati nella Sezione 4.3.

5.1 L'analogia elettrica

Grazie all'adozione del metodo analogico, le leggi di Fourier e della continuità che descrivono un problema termico in regime non stazionario trovano soluzione attraverso la risoluzione delle equazioni di Ohm e di Coulomb che descrivono il transitorio del circuito elettrico equivalente. L'analogia tra leggi che descrivono un circuito elettrico e leggi che descrivono il trasporto di calore implica di stabilire delle analogie tra grandezze elettriche e grandezze termiche, come riportato in tabella 5.1.

Gr. termica	Gr. elettrica
temperatura	differenza di potenziale
flusso termico	corrente elettrica
resistenza termica	resistenza elettrica
capacità termica	capacità elettrica

Table 5.1. Analogia tra grandezze termiche ed elettriche.

La potenza del metodo analogico risiede nella possibilità che offre di discretizzare un problema termico anche complesso, permettendo la risoluzione semplificata dello stesso. Un tipico esempio di applicazione del metodo analogico è quello della modellazione delle pareti multistrato, in cui la risposta termica della parete è individuata risolvendo il circuito elettrico costruito associando a ciascuno strato una resistenza ed una capacità elettriche [21].

Nel caso dell'identificazione proposta, il modello elettrico equivalente risulta semplice: ciò permette un'identificazione immediata del HTC , con un impiego di strumenti di misura ed informatici molto semplici ed economici (non vengono utilizzati i dati rilevati dalla termocamera ed il calcolo del HTC ottimo può essere effettuato in pochi millesimi di secondo con un foglio di calcolo).

5.1.1 Il modello elettrico

Il problema dello scambio termico tra campione e stampi è stato modellato secondo l'analogia termoelettrica proposta in Figura 5.1. Il modello presuppone che il flusso termico in corrispondenza del punto di misura

sia monodimensionale. Questa assunzione ha validità locale limitata al punto di misura A (Figura 3.11), mentre per i punti di misura B e C, più vicini al bordo del campione, questa assunzione non è corretta. Pertanto l'identificazione analitica sfrutta il solo dato rilevato dalla termocoppia centrale: ciò semplifica la procedura di identificazione e la rende molto snella, sia dal punto di vista di rilevazione che di elaborazione dei dati, ma rende di fatto impossibile impostare un metodo rigoroso di qualificazione dei risultati ottenuti.

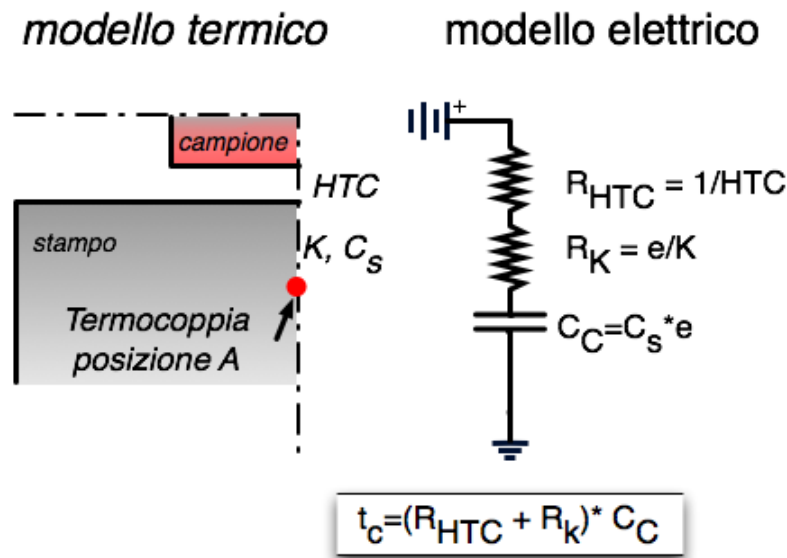


Fig. 5.1. Analogia elettrica.

Il condensatore, posto in corrispondenza del punto di misura centrale (posizione A, Figura 3.11), ha capacità pari alla capacità termica totale della porzione di materiale che separa la termocoppia dalla superficie di scambio termico, data dalla formula 5.1.

$$C_C = C_s \rho e \quad (5.1)$$

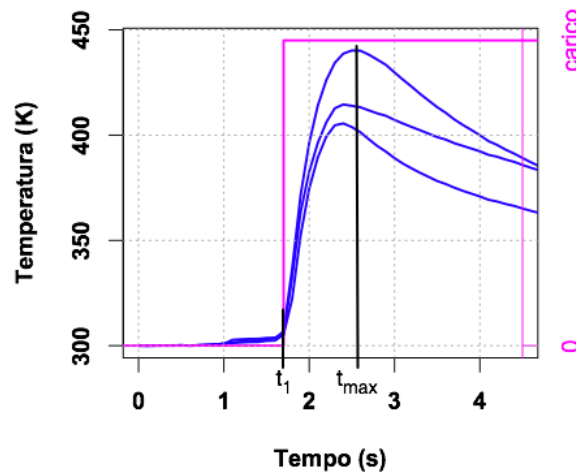
La resistenza termica offerta dalla porzione di materiale che separa il punto di misura dalla superficie di scambio termico è data da:

$$R_k = \frac{e}{k} \quad (5.2)$$

Table 5.2. Capacità e resistenze degli stampi in corrispondenza dei punti di misura.

		acciaio	allumina	macor	zirconia p.s.
A	$C_C \left[\frac{J}{(m^2 K)} \right]$	1744	982	995	1208
	$R_k \left[\frac{sK}{(J)} \right]$	74	105	1370	800

La carica del condensatore nel modello elettrico corrisponde all'innalzamento di temperatura nel sistema termico. Il tempo di carica completa del condensatore, equivalente al tempo di raggiungimento della temperatura massima, è pari a tre volte la costante di tempo del sistema (t_c , Figura 5.1). A ciascun punto di rilievo della temperatura (A, B, C, Figura 3.11)

**Fig. 5.2.** Tempo di raggiungimento della temperatura massima in posizione A.

In formule:

$$t_m = t_{max} - t_1 \quad (5.3)$$

$$t_m = 3 ((R_{HTC} + R_k) C_C) \quad (5.4)$$

dove R_k e C_C sono dati in tabella 5.2 e t_m è misurato in ciascuna prova (Figura 5.2).

Il valore di HTC può essere così calcolato attraverso la formula:

$$HTC = \frac{3 \rho C e k}{k t_m - 3 \rho C e^2} \quad (5.5)$$

5.1.2 Risultati

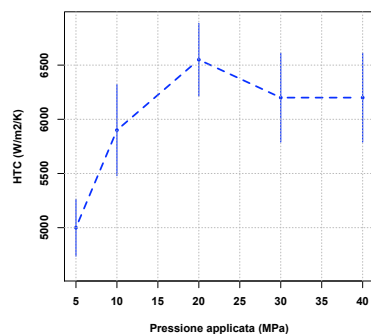
La dispersione dei valori di HTC identificati col metodo analogico è relativamente contenuta (Figura 5.3) e l'andamento della curva HTC vs P è in linea con i risultati presenti in letteratura [62], [50], e con quelli rilevati col metodo dell'analisi inversa. L'identificazione è stata condotta unicamente sulla termocoppia centrale, in quanto i risultati ottenuti per le termocoppie laterali non sono attendibili. Ciò si deve al fatto che il modello elettrico è monodimensionale, e questa condizione, nel test reale, si perde allontanandosi dalla superficie d'interfaccia stampo-campione.

Il metodo dell'identificazione analitica, vista la sua estrema semplicità, si propone quindi come una alternativa all'analisi inversa per test comparativi tra gli HTC , mentre l'attendibilità ridotta e comunque non quantificabile dei suoi risultati ne scoraggia l'impiego per l'identificazione del HTC .

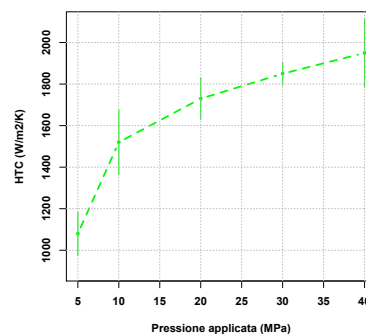
La forza del metodo presentato in questa Sezione è la sua semplicità: per il rilevamento dai dati necessari all'identificazione non occorrono strumenti di misura particolarmente sofisticati, ma è sufficiente una termocoppia ed un sistema di acquisizione adeguato. Per la parte di calcolo relativa all'identificazione, il procedimento è estremamente semplice e sfrutta una formula analitica: rispetto all'analisi inversa (termocamera, software FE su tutti), l'identificazione analitica si propone come valido strumento comparativo, utile per un utilizzo tecnico piuttosto che scientifico.

5.2 Confronto tra i risultati ottenuti

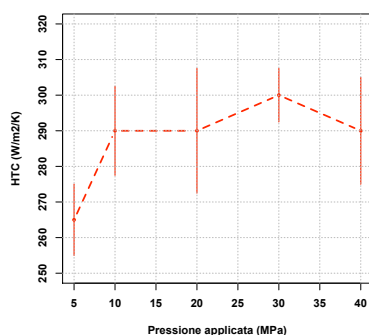
I valori di HTC identificati analiticamente sono diversi rispetto a quelli identificati per analisi inversa: dai grafici riportati in Figura 5.4 si può apprezzare come gli HTC_{ae} (HTC identificati con l'analogia elettrica) siano, mediamente, maggiori di circa il 30% rispetto agli HTC_{ai} . La presenza di un errore sistematico indica, ragionevolmente, uno scostamento tra il modello utilizzato per l'identificazione ed il fenomeno



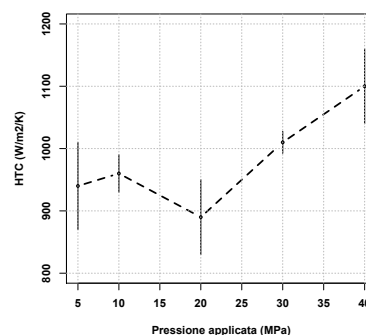
(a) Stampo in acciaio



(b) Stampo in allumina



(c) Stampo in macor



(d) Stampo in zirconia p.s.

Fig. 5.3. Andamento del HTC in funzione della pressione di contatto con bande di deviazione standard sui test.

reale.

Analizzando il flusso termico per il punto A (Figura 5.5, sulla base dei dati di Figura 4.2) si apprezza che l'entità del flusso termico in direzione normale a quella considerata per la modellazione monodimensionale è decisamente maggiore a valle rispetto che a monte del punto A. Per questo motivo la temperatura rilevata alla termocoppia raggiunge il suo massimo (a parità di HTC) in tempi minori rispetto a quelli previsti dal modello monodimensionale.

L'analisi del flusso termico passante per i punti di rilievo della temperatura evidenzia inoltre come l'attendibilità del modello analogico sia estremamente sensibile alla distanza dalla superficie di interfaccia stampo-campione. A dimostrazione di ciò, si può apprezzare come i

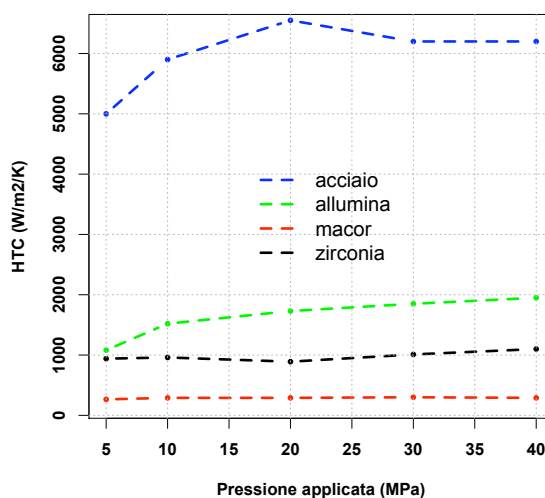


Fig. 5.4. Confronto tra gli HTC identificati attraverso l'analogia elettrica.

risultati dell'identificazione analitica condotta sulle termocoppie laterali siano comunque realistici, mentre per l'identificazione tramite metodo analogico i valori tendano decisamente ad essere troppo elevati.

A conferma della maggior attendibilità dei risultati ottenuti attraverso analisi inversa, la dispersione degli HTC_{ai} è minore rispetto a quella degli HTC_{ae} (Figura 5.7): il maggior numero di dati di ingresso disponibili per l'analisi inversa rispetto all'identificazione analitica comporta una soluzione più precisa del problema.

5.3 Confronto con i risultati presenti in letteratura

In letteratura (Sezione 2.3.1) i dati disponibili riguardano solamente stampi in acciaio, ad oggi unico materiale impiegato nella costruzione di utensili per stampaggio a caldo. L'identificazione analitica utilizzata dagli autori del lavoro presentato nella Sezione 2.3.1 è sicuramente molto più raffinata rispetto all'identificazione attraverso analogia termica, ma presenta delle assunzioni la cui validità va comunque subordinata alla tecnica di conduzione del test. Innanzitutto l'applicazione della Equazione 2.11 presuppone flusso termico monodimensionale in corrispondenza dei punti di misura della temperatura: ciò è tanto

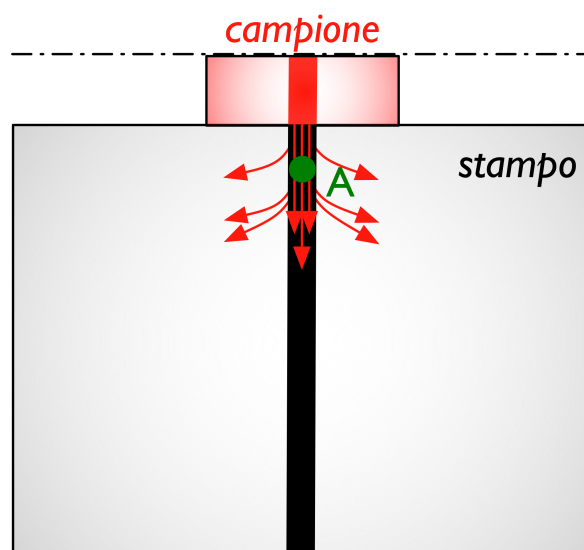
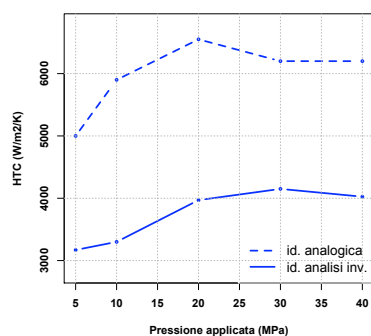


Fig. 5.5. Flusso termico passante per il punto di rilevazione della temperatura A.

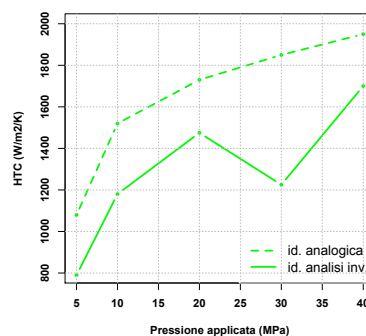
più corretto quanto più i punti di misura (sul campione e sugli stampi) sono vicini all'interfaccia tra i corpi, e quanto più le dimensioni del campione ed il posizionamento strategico delle termocoppie rendono le misure insensibili alle condizioni al contorno (condizioni di convezione sulle superfici esposte in aria di stampo e campione). Nell'impossibilità di verificare la procedura operativa di rilevamento dei dati per l'identificazione, delle importanti riflessioni per la comparazione tra i metodi possono essere fatte basandosi sull'entità della deviazione standard associata alle misure.

Alla pressione di contatto di 40 MPa, il valore di HTC identificato attraverso la tecnica analitica [63] è di $3000 \text{ W/m}^2/\text{K}$, con una deviazione standard associata di $1200 \text{ W/m}^2/\text{K}$ (Figura 2.5); attraverso l'utilizzo dell'analisi inversa agli elementi fini il valore di HTC è di $4100 \text{ W/m}^2/\text{K}$, con una deviazione standard di $300 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

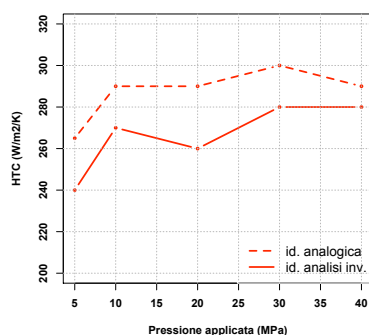
L'andamento del HTC rispetto alla pressione di contatto per l'acciaio è in linea con quanto previsto da diversi lavori di letteratura esaminati [62, 64, 65]: la buona concordanza dei risultati dell'identificazione per stampi in acciaio e l'entità della deviazione standard sui dati identificati, costante (in valore percentuale) per tutti i materiali testati indica una buona attendibilità dei valori di HTC identificati anche per stampi in allumina, macor e zirconia parzialmente stabilizzata.



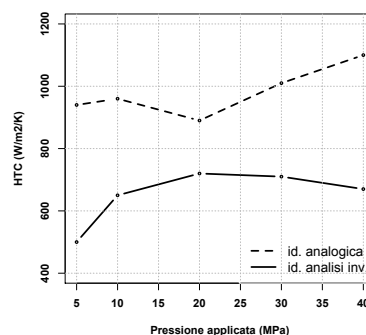
(a) Stampo in acciaio



(b) Stampo in allumina



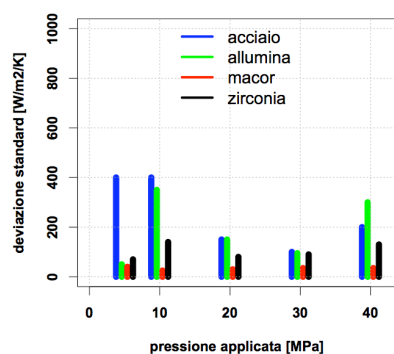
(c) Stampo in macor



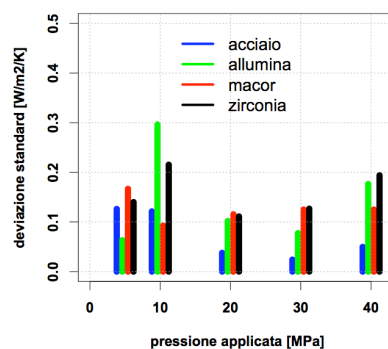
(d) Stampo in zirconia p.s.

Fig. 5.6. Confronto tra gli HTC identificati mediante analogia elettrica e mediante analisi inversa.

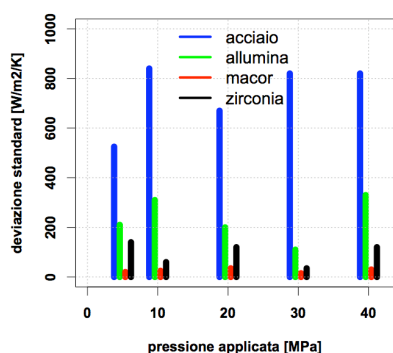
Per il processo di stampaggio a caldo tradizionale, la precisione di stima del HTC ha importanza tecnologica relativa, in quanto l'utilizzo di stampi in acciaio raffreddati è garanzia di un raffreddamento del pezzo con velocità ben maggiori dei 27 K/s; nel momento in cui l'affacciarsi sul mercato di materiali ceramici altamente tecnici apre nuove prospettive a questo tipo di tecnologia, diviene assolutamente importante determinare il HTC con la massima precisione possibile, al fine di sfruttare appieno le possibilità del processo in chiave di produzione di componenti a microstruttura non martensitica.



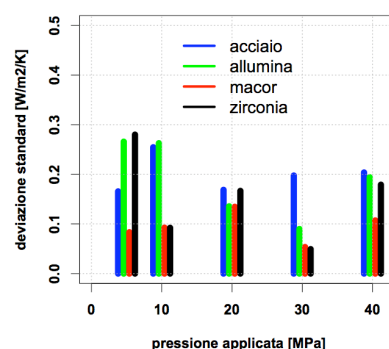
(a) Deviazione standard dei valori identificati tramite analisi inversa



(b) Deviazione standard dei valori identificati tramite analisi inversa normalizzata sui valori identificati attraverso l'analisi inversa



(c) Deviazione standard dei valori identificati tramite analogia elettrica



(d) Deviazione standard dei valori identificati tramite analogia elettrica normalizzata sui valori identificati attraverso l'analisi inversa

Fig. 5.7. Deviazione standard per le due tecniche di identificazione utilizzate.

Simulazione di processo

L'analisi del comportamento di stampi in materiali alternativi al tradizionale acciaio prospetta nuovi orizzonti per lo stampaggio a caldo di lamiere in acciaio al boro. La tecnologia di lavorazione di queste lamiere, presentata nella Sezione 2.1, orientata alla produzione di componenti a microstruttura completamente martensitica, può arricchirsi con l'impiego di utensili da stampaggio in materiale ceramico, che consentono un maggior controllo del raffreddamento del componente e l'importante possibilità di ottenere, in modo affidabile, microstrutture non martensitiche. Per comprendere le potenzialità dei materiali ceramici, si possono sfruttare i valori di HTC identificati per eseguire delle simulazioni FE che replicano il processo industriale (e non più il test di laboratorio) e valutare così la gamma di velocità di raffreddamento ottenibili.

La simulazione è condotta utilizzando stampi in zirconia parzialmente stabilizzata ed in macor: nonostante le sue proprietà termiche meno estreme della prima rispetto a quelle del secondo, il suo utilizzo industriale è altamente favorevole viste le sue proprietà meccaniche. Inoltre, nel corso dei test di laboratorio, il macor ha dimostrato di sopportare meno bene rispetto alla zirconia p.s. le sollecitazioni termomeccaniche indotte dallo stampaggio a caldo.

6.1 La simulazione

La simulazione di processo si riferisce a un ipotetico processo standard: i parametri di input sono stimati attraverso l'analisi del materiale disponibile in letteratura, riferita all'utilizzo di stampi in acciaio, e attraverso delle considerazioni tecnologiche che verranno approfondite

nei prossimi Paragrafi. Allo stesso modo, per conferire la massima generalità alla simulazione, la configurazione geometrica è estremamente semplice e ricalca in parte quella utilizzata per l'identificazione.

Importante ai fini del risultato della simulazione e della sua validità tecnologica, è la scelta della temperatura del materiale dello stampo: mentre lo stato attuale della tecnologia consiglia il raffreddamento degli stampi in acciaio per aumentare l'estrazione di calore dal pezzo, l'impiego di materiali ceramici e la diversa finalità (microstrutturale) del processo suggerisce di individuare una temperatura di regime degli stampi che sia compatibile con il processo e che consenta di ottenere il risultato desiderato.

La temperatura iniziale della lamiera è scelta in linea con quelle tipiche riportate in letteratura [66], in accordo con quelle utilizzate per l'identificazione: ciò permette l'utilizzo dei dati di HTC identificati per la simulazione di processo ed un confronto dei risultati della simulazione con quelli presenti in lavori simili.

6.1.1 La configurazione geometrica

La simulazione è condotta su una lamiera dello stesso materiale e spessore del campione utilizzato e con stampi in materiale (macor e zirconia p.s.) identico a quello utilizzato per l'identificazione del HTC . Anche la configurazione geometrica scelta ricalca quella proposta per i test di identificazione: viene eseguita una compressione omogenea della lamiera all'interno della finestra di pressione applicata considerata nell'identificazione. Questi accorgimenti permettono di utilizzare le leggi di comportamento dei materiali individuate in letteratura e verificate attraverso l'identificazione, e di utilizzare i parametri numerici (dimensione della mesh, tolleranza sul contatto, ecc ...) individuati nelle simulazioni preliminari all'identificazione.

In letteratura sono presenti molti lavori dedicati alla simulazione numerica dei processi di stampaggio a caldo della lamiera [67], molti dei quali fanno riferimento ad un preciso processo industriale [18]. Assumere una geometria standard per tali processi non è possibile, vista la varietà e la complessità dei componenti prodotti con questa tecnologia. Lo stampaggio piano è comunque la configurazione più semplice, dal punto di vista della realizzazione del test, della sua ripetibilità e della possibilità di estendere i risultati a casi diversi.

Si imposta quindi la simulazione su di una lamiera quadrata di lato

100 mm, compressa tra due stampi di uguale estensione e dello spessore di 50 mm (Figura:6.1): il rapporto tra capacità termica della lamiera e dello stampo è molto importante, in quanto un valore troppo alto di questo parametro rende il raffreddamento della lamiera indesirabilmente sensibile alle condizioni al contorno impostate sugli stampi.

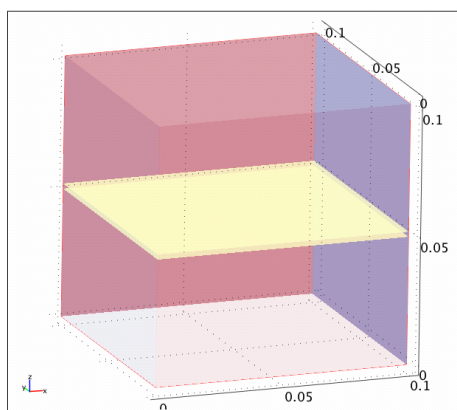


Fig. 6.1. Geometria del modello utilizzato per le simulazioni di processo.

6.1.2 I materiali

La simulazione è stata condotta utilizzando due materiali per lo stampo: la zirconia p. s., che presenta eccellenti proprietà meccaniche e proprietà termiche adeguate allo scopo del suo impiego, ed il macor, che offre maggiori possibilità nella progettazione del processo dal punto di vista termico, ma non appare idoneo meccanicamente ad un impiego come utensile da stampaggio a caldo.

Considerando la “giovinezza” di questi materiali, appare verosimile che nell’arco di pochi anni si possano trovare tecniche di sinterizzazione in grado di conferire proprietà termiche ancora più estreme alla zirconia parzialmente stabilizzata, piuttosto che proprietà meccaniche migliori per il macor. I parametri che descrivono il comportamento termico e meccanico di questi materiali sono stati reperiti in letteratura e sono riportati nella Sezione 3.3.3 [68].

La simulazione non è condotta su stampi in allumina ed acciaio: la prima, pur essendo un materiale ceramico, non offre prestazioni significativamente differenti rispetto all’acciaio stesso; d’altro canto,

l'impiego dell'acciaio in un processo la cui finalità è produrre componenti a microstruttura dolce rispetto a quella martensitica (ferritico-perlitica o ferritico-bainitica) non ha, attualmente, ragione d'essere.

6.1.3 I parametri di input

I parametri di input della simulazione sono:

- temperatura iniziale della lamiera;
- temperatura iniziale degli stampi;
- HTC ;

La simulazione è eseguita inserendo come dati di input i valori caratteristici riscontrabili nel processo industriale, gli stessi utilizzati come riferimento per l'identificazione: la temperatura della lamiera nell'istante di chiusura degli stampi è di 1000 K, ed gli HTC sono quelli identificati alla pressione di 20 MPa e riportati in Tabella 6.1.3.

		macor zirconia p.s.	
HTC	W/m ² /K	300	700
T stampi	°C	200	200
T campione	°C	1000	1000

Table 6.1. Dati di input delle simulazioni di processo.

La temperatura iniziale degli stampi è scelta sulla base di considerazioni tecnologiche riguardanti il processo. La pratica industriale attuale prevede l'utilizzo esclusivo dell'acciaio come materiale per gli stampi e persegue l'ottenimento di elevate velocità di raffreddamento: gli stampi vengono raffreddati e mantenuti a temperatura ambiente (o quasi). Nell'ottica di una progettazione del processo finalizzata alla riduzione delle velocità di raffreddamento della lamiera con impiego dei materiali ceramici per gli stampi, è desiderabile una temperatura degli stampi sufficientemente elevata, funzionale appunto ad un raffreddamento lento del pezzo. D'altro canto la temperatura degli stampi, a regime, non può superare il valore di circa 200 °C, dettato dalle esigenze di estrazione del pezzo.

Escludendo, in questa fase, la possibilità di riscaldare gli stampi per rallentare il raffreddamento del pezzo, è stata condotta un'analisi del

ciclo termico cui gli stampi sono sottoposti per determinare la temperatura che essi assumono a regime. I dati di letteratura [18], riguardanti stampi in acciaio, mostrano un andamento (rilevato) sinusoidale della temperatura all'interno dello stampo, che tende, dopo un numero piuttosto esiguo (10) di cicli di stampaggio ad assestarsi attorno al valore di 500 K.

In proposito, è stata condotta una simulazione (monodimensionale con stampi in zirconia p.s., Figura 6.2) in cui lo stampo viene sottoposto a dei cicli termici che simulano quelli reali. Con riferimento alla Figura 6.2, il coefficiente di convezione impostato sull'estremità destra del segmento blu (che rappresenta lo stampo, del quale ha le proprietà termiche) è di $50 \text{ W/m}^2/\text{K}$. L'estremità sinistra dello stesso segmento è posta in contatto con il segmento rosso (che rappresenta la lamiera, della quale ha le proprietà termiche), posto alla temperatura iniziale di 700°C . I due segmenti rimangono a contatto per 10 s, dopodiché il segmento rosso viene rimosso e sull'estremità destra del segmento blu, esposta in aria, vengono applicati per 10 s un coefficiente di scambio termico convettivo di $50 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ed un'emissività di 0.9 [69]. Questo ciclo viene ripetuto 100 volte, rilevando istante per istante la temperatura su 4 punti disposti sul segmento blu a distanze dall'estremità sinistra di 10-20-30-50 mm (Figura 6.3).

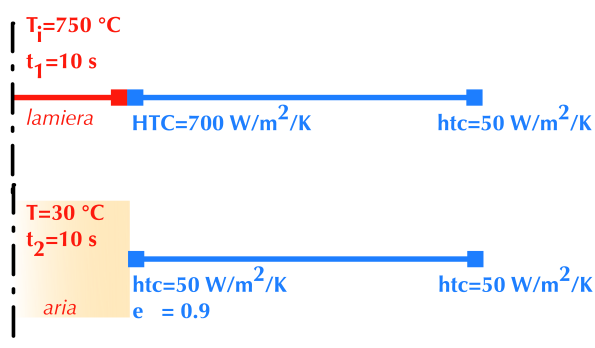


Fig. 6.2. Rappresentazione del ciclo termico di stampaggio semplificato.

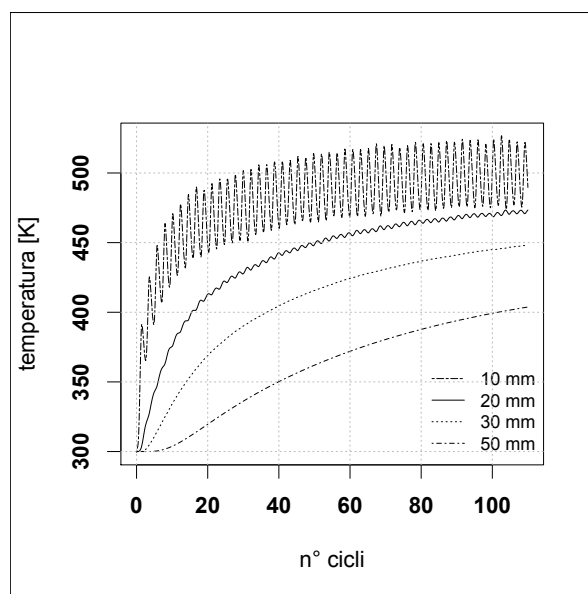


Fig. 6.3. Andamento delle temperature all'interno dello stampo all'aumentare del numero di cicli di stampaggio.

6.2 Risultati

Le curve di raffreddamento individuate sono state sovrapposte alle curve CCT fornite da Arcelor per l'Usibor 1500P[®]. Per la valutazione della microstruttura finale del pezzo le curve sono state modificate in accordo con i dati riportati in letteratura [70]: lo stato di sforzo indotto nella lamiera nella pratica industriale come nella simulazione eseguita causa uno spostamento verso sinistra delle curve CCT di circa 5 K.

Il raffreddamento della lamiera, riportato nelle Figure 6.4, 6.5, 6.6 per lo stampo in zirconia p.s., evidenzia che per poter estrarre il pezzo ad una temperatura prossima ai 200 °C è necessaria una permanenza in stampo di poco più di due minuti.

Il profilo di discesa di temperatura del campione 6.7 per lo stampaggio con il macor è abbastanza lento da tagliare la zona della trasformazione bainitica, ottenendo un componente finale dalle caratteristiche microstrutturali radicalmente diverse rispetto al processo di stampaggio a caldo tradizionale.

L'utilizzo della zirconia p.s. come materiali per gli stampi induce un raffreddamento leggermente più rapido, ed il confronto con le curve CCT non offre garanzie riguardo la microstruttura del pezzo ottenuto.

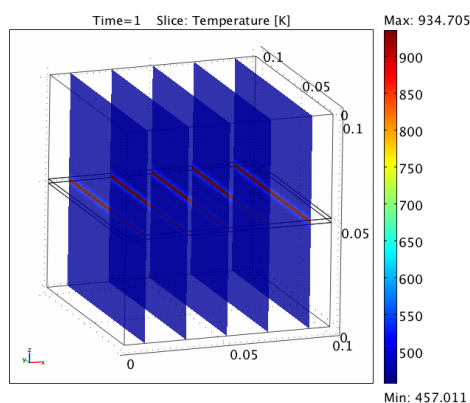


Fig. 6.4. Campo termico di stampo (zirconia p.s.) e lamiera dopo 1 s dal contatto.

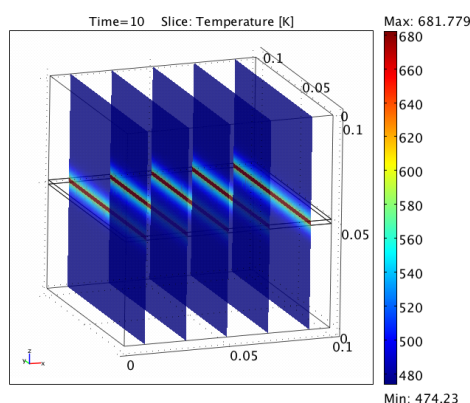


Fig. 6.5. Campo termico di stampo (zirconia p.s.) e lamiera dopo 10 s dal contatto.

Dal confronto tra i risultati delle simulazioni, il HTC , il peso specifico del materiale, la capacità termica specifica e la conducibilità termica specifica sono i parametri del materiale dello stampo che regolano il raffreddamento del pezzo. In particolare per il caso della zirconia p.s., un'ulteriore diminuzione della sua conducibilità comporterebbe l'ottenimento di velocità di raffreddamento particolarmente basse.

L'interesse maggiore che possono rappresentare i materiali ceramici come materiali per lo stampaggio a caldo, è sicuramente il loro impiego non come utensili integrali, ma come inserti, da posizionare strategicamente nello stampo, in tradizionale acciaio. Questo tipo di impiego

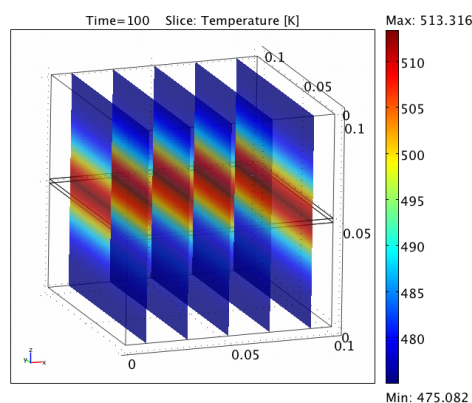


Fig. 6.6. Campo termico di stampo (zirconia p.s.) e lamiera dopo 2 min. dal contatto.

è subordinato al fatto che inserti e stampi abbiano delle deformazioni termiche indotte simili, e tali da non pregiudicare il funzionamento dello stampo (sforzi di trazione sullo stampo, piuttosto che fessurazioni all'interfaccia stampo-inserto): in questo senso, un confronto tra i coefficienti di dilatazione termica lineare di acciaio ($13.3E - 6$), macor ($9.3E - 6$) e zirconia p.s. ($10.4E - 6$) incoraggia lo sviluppo di questi tipi di utensile.

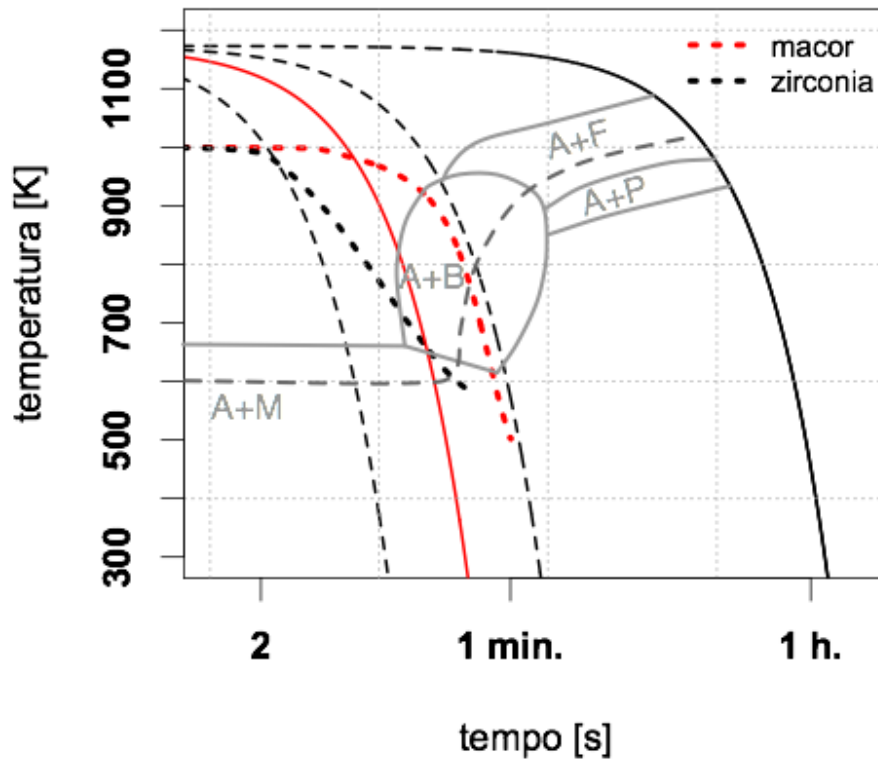


Fig. 6.7. Curve di raffreddamento per stampi in macor e zirconia p.s. a temperatura di regime sovrapposte alle curve CCT.

Conclusioni

Ad oggi il processo di stampaggio a caldo delle lamiere al boro è condotto unicamente con stampi in acciaio ed è finalizzato alla produzione di componenti a microstruttura martensitica. Lo sviluppo, recente, di materiali ceramici dalle elevatissime prestazioni meccaniche ha suggerito lo svolgimento di questo lavoro di tesi. Prima della progettazione di un test per la qualificazione dell'impiego di questi materiali come utensili per lo stampaggio a caldo, sono state analizzate le metodologie di determinazione del HTC nei processi industriali di formatura della lamiera e massiva. L'obiettivo di approntare un test semplice e ripetibile è stato raggiunto, proponendo due soluzioni: la prima, basata sull'identificazione del HTC tramite analisi inversa agli elementi finiti, offre risultati precisi ed accurati, presentando però una complessità di rilevamento e di elaborazione dei dati che la rendono più appetibile per un impiego in campo scientifico ed accademico piuttosto che industriale. La seconda tecnica, basata sull'applicazione del metodo analogico, è estremamente adatta ad un'applicazione in campo industriale: i risultati, affetti da un errore sistematico dovuto alla schematizzazione monodimensionale introdotta, presentano notevole ripetibilità e sembrano particolarmente adatti a test comparativi sui materiali.

I test condotti hanno evidenziato l'importanza del materiale (acciaio, allumina, macor, zirconia parzialmente stabilizzata) dello stampo sul valore di HTC che si riscontra all'interfaccia con la lamiera e soprattutto sulla velocità di raffreddamento della lamiera stessa. Per stampi in macor e zirconia p.s. si prospetta la possibilità di un impiego per la produzione di componenti a struttura mista bainitico-martensitica. La possibilità reale di sfruttare industrialmente i materiali ceramici prefigura addirittura l'opportunità di realizzare in un'unica stazione

di stampaggio dei componenti con gradiente microstrutturale grazie all'impiego di utensili con inserti in ceramico posizionati nelle zone in cui si desidera rallentare il raffreddamento.

Riferimenti bibliografici

1. <http://w3.uniroma1.it/arslantepe/metallurgia.htm>, June 2009.
2. V. Ariosi and C. Marzi. *Stampi e lavorazione della lamiera*, volume 2. Hoepli Editore, 1987.
3. M. Eriksson. *Modelling of Forming and Quenching of Ultra High Strength Steel Components for Vehicle Structures*. PhD thesis, Luleå University of Technology, 2002.
4. H. Hayashi and T. Nakagawa. *Recent Trends in Sheet Metals and their Formability in Manufacturing Automotive Panels*. Journal of Materials Processing Technology, 46, 455–487, 1994.
5. P. Hein. *A global approach of the finite element simulation of hot stamping*. Advanced materials research, 6-8, 763–770, 2005.
6. M. Takahashi. *Developed of High Strength Steels for automobiles*. Nippon Steel Technical Report, 88, July 2003.
7. T. G. Byrer. *Forging Handbook*. Forging Industry Association, 1985.
8. M. Rossi. *Stampaggio a caldo dei metalli*. Etas Kompass, 1977.
9. S. Masayoshi, M. Jun, K. Kazuhisa, O. Masahiro, and M. Toshihiro. *Properties of Aluminized Steels for Hot Forming*. In IBEC 2003, Chiba, Japan, 2003, ISAE, pages 267–272, 2003.
10. K. Mori, S. Maki, and Y. Tanaka. *Warm and hot stamping of ultra high strength steel sheets using resistance heating*. In Annals of the CIRP, volume 54, pages 209–212, 2005.
11. K. Mori, K. Akita, and Y. Abe. *Springback behaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press*. International Journal of Machine Tools Manufacture, 47, 321–325, 2007.
12. ArcelorMittal. *Conferma dell'Automotive Symposium: l'acciaio è sempre il numero 1*. Update: rivista clienti, 2007.
13. W. Nicodemi. *Metallurgia. Principi generali*. Zanichelli, 2007.
14. A. D. Wilson. *Guidelines for Fabricating and Processing Plate Steel*. In B. Harbor, editor, Bethlehem-Lukens Plate Report, 2000.
15. P. F. Bariani, S. Bruschi, and A. Ghiotti. *Stampaggio a caldo di lamiere in acciaio altoresistenziale*, 2008.
16. D. Lorenz and K. Roll. *Simulation of Hot Stamping and Quenching of Boron Alloyed Steel*. In 7th Int. ESAFORM Conf. on Mat. Forming, 4 2004.
17. M. Merklein, J. Lechler, and T. Stoehr. *Characterization of tribological and thermal properties of metallic coatings for hot stamping boron-manganese steels*. In Proceedings of the 7th International Conference 'THL' Coatings in Manufacturing Engineering, Chalkidiki, Greece, 1-3 October 2008.
18. H. Hoffmann, H. So, and H. Steinbeiss. *Design of Hot Stamping Tools with Cooling System*. Annals of the CIRP, 56 1, 269–272, 2007.
19. F. Kreith. *Principi di trasmissione del calore*. Liguori Editore, 1976.

20. F. P. Incropera and D. P. D. Witt. *Fundamentals of Heat and Mass Trasfer*. John Wiley Sons, 1985.
21. C. Bonacina, A. Cavallini, and L. Mattarolo. *Trasmissione del calore*. CLEUP, 1985.
22. G. Guglielmini and C. Pisoni, editors. *Introduzione alla trasmissione del calore*. C.E.A., 2002.
23. Y. A. Cengel. *Termodinamica e Trasmissione del Calore*. McGraw Hill, 1998.
24. P. Wriggers and G. Zavarise. *Thermomechanical contact - A rigorous but simple numerical approach*. Computers and Structures, 46 1, 47–53, 1993.
25. P. Bhushan. *Applications of Tribology*. John Wiley Sons, 1999.
26. G. Straffellini. *Attrito e usura. Metodologie di progettazione e controllo*. Tecniche Nuove, 2005.
27. Z. W. Xing, J. Bao, and Y. Y. Yang. *Numerical simulation of hot stamping of quenchable boron steel*. Mater. Sci. Eng. A, 499, 28–31, 2009.
28. J. Mackerle. *Finite element analyses and simulations of manufacturing processes of composites and their mechanical properties: a bibliography (1985–2003)*. Computational Materials Science, 31, 187–219, November 2004.
29. J. Kanga, K. Leeb, and S. Kangb. *Characterization of cooling heat transfer for various coolant conditions in warm forging process*. J. Mater. Process. Technol., 184, 338–344, 2007.
30. M. Merklein and J. Lechler. *Determination of influencing parameter of the hot stamping process*. In Asia Steel Conference Proceedings, 2006.
31. B. P.F., B. S., G. A., and T. A. *Testing formability in hot stamping of HSS*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 57, 265–268, 2008.
32. G. Dusserre, G. Dour, and G. Bernhart. *In-situ determination of the heat flux density at the glass/mould interface during a glass pressing production cycle*. Int. J. of Thermal Sciences, 48, 428–439, 2009.
33. I. N. Dul'kin and G. I. Garas'ko. *Analysis of the 1-D heat conduction problem for a single fin with temperature dependent heat transfer coefficient: Part I - Extended inverse and direct solutions*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 3309–3324, 2008.
34. G. Dour, M. Dargush, and C. Davidson. *Recommendations and guidelines for the performance of accurate heat transfer measurement in rapid forming processes*. Int. J. of Heat and Mass Transfer, 49, 1773–1789, 2006.
35. R. de Carvalho, R. Valente, and A. Andrade-Campos. *Optimization Strategies for Non-linear Material Parameters Identification in Metal Forming Problems*. In Solid Mechanics Conference Proceedings, September 2009.
36. J. Caseiro and A. Andrade-Campos. *An evolutionary-inspired optimization algorithm suitable for solid mechanics angineering inverse problems*. In ESMC2009 Proceedings, 2009.
37. J. Beck and K. Arnold. *Parameter estimation in Engineering and Science* John Wiley Sons, 1986.
38. R. C. Metha and T. Jayachandran. *Determination of Heat Transfer Coefficient using transient temperature response chart*. Warne and Stoffubertragung, 26, 1–5, 1990.
39. *Introduction to Operations Research*. McGraw-Hill, 2004.
40. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
41. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Gottlieb, and M. A. Sands. *La Fisica di Feynman*. Zanichelli, 2007.
42. R. W. C. Michael B. Bever. *Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materrials*. R. J. Brook, 1991.
43. M. Alfano, F. Inchingolo, C. Maletta, and M. Marrelli. *Caratterizzazione di materiali ceramici per applicazioni odontoiatriche*. In AIAS-Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, 2008.
44. I. Denry and J. R. Kelly. *State of the art of zirconia for dental applications*. Dental Materials, 24, 299–307, 2008.
45. J. R. Kelly and I. Denry. *Stabilized zirconia as a structural ceramic: an overview*. Dental Materials, 24, 289–298, 2008.

46. M. Croin. *Modelling Interactions among Press, Tools and Workpiece in Hot Forging Operations*, 2006.
47. F. Tondini, P. Bosetti, and S. Bruschi. *An Experimental-Numerical Procedure to Identify Heat Transfer Coefficient in Hot Stamping Processes*. In Euromech, Solid Mechanics Conference, 2009.
48. F. Tondini, P. Bosetti, and S. Bruschi. *Heat Transfer Coefficient Identification in Hot Stamping Processes*. In Complas X, International Conference on Computational Plasticity, 2009.
49. M. Terčelj, R. Turk, and M. Knap. *Assessment of temperature on the die surface in laboratory hot metal forming*. Applied Thermal Engineering, **23**, 113–125, 2003.
50. M. Merklein, J. Lechler, and M. Geiger. *Characterisation of the Flow Properties of the Quenchable Ultra High Strength Steel 22MnB5*. Annals of the CIRP, **55**, 2006.
51. K. Hinkelmann and O. Kempyhorne. *Design and Analysis of Experiments*. Wiley, 2005.
52. <http://www.bohler-edelstahl.com>, June 2008.
53. J. Quinn, V. Sundar, and I. Lloyd. *Influence of microstructure and chemistry on the fracture toughness of dental ceramics*. Dental Materials, **19** 7, 603, 2003.
54. <http://www.matweb.com>, September 2008.
55. <http://www.macor.info>, October 2007.
56. P. Manicone, P. R. Iommetti, and L. Raffaelli. *An overview of zirconia ceramics: Basic properties and clinical applications*. Journal of Dentistry, **35** 11, 819–826, 2007.
57. <http://www.htc-bioceramics.com>, June 2008.
58. *Investigation of the thermal, mechanical and microstructural properties of quenchable high strength steels in hot stamping operations*. Ph.D Thesis, Università degli Studi di Padova, 2008.
59. Anon. *Practical Data for metallurgists*. The Timken Company, 2006.
60. *Comsol User's Guide*, 2008.
61. S. Conte and C. de Boor. *Elementary Numerical Analysis*. McGraw Hill, 1980.
62. L. Garcia-Aranda. *Etude thermo-mécanique et modélisation numérique de l'emboutissage à chaud de l'Usibor 1500*. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris, 2004.
63. M. Merklein and J. Lechler. *Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels*. J. Mater. Process. Technol., **177**, 452–455, 2006.
64. L. Garcia-Aranda, P. Ravier, and Y. Chastel. *Hot Stamping of Quenchable Steels: Material Data and Process Simulations*. In IDDRG 2003 Conference Proceedings, pages 155–164, 2003.
65. Z. Malinowski, J. Lenards, and M. E. Davies. *A Study of the Heat Transfer Coefficient as a Function of Temperature and Pressure*. Journal of Materials Processing Technology, **42**, 125–142, 1994.
66. R. Kolleck, R. Veit, M. Merklein, J. Lechler, and M. Geiger. *Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, **58**, 275–278, 2009.
67. M. Tisza. *Numerical modelling and simulation in sheet metal forming*. Journal of Materials Processing Technology, **151**, 58–62, 2004.
68. M. Eriksson, M. Oldenburg, M. Somani, and L. Karjalainen. *Testing and Evaluation of Material Data for Analysis of Forming and Hardening of Boron Steel Components.*, 2002.
69. R. Brandt, M. Friess, and G. Neuer. *Thermal conductivity, specific heat capacity, and emissivity of ceramic matrix composites at high temperatures*. High Temp-High Press, pages 167–177, 2004.
70. P. F. Bariani, S. Bruschi, A. Ghiotti, and A. Turetta. *Testing formability in the hot stamping of HSS*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, **57**, 265–268, 2008.